

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

# **Blízké pole elektricky malé smyčkové antény**

## **Near-Field of Magnetic Loop Antenna**

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Jabůrek**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612T059 Mobilní technologie

Téma: **Blízké pole elektricky malé smyčkové antény**  
**Near-Field of Magnetic Loop Antenna**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Elektricky malé smyčkové antény prožívají v radioamatérské komunitě po letech svůj návrat. Málo kdo si ovšem uvědomuje potenciální nebezpečí při umístění vysílací antény blízko obsluhy. Student má za úkol provést simulaci a odměřit hodnoty blízkého pole kolem antény.

Vypracovaná práce bude splňovat následující body zadání:

1. Stručný popis antény.
2. Simulace blízkého pole antény dle zadaných parametrů.
3. Rešerše hygienických limitů elektromagnetického pole.
4. Odměření skutečných hodnot na modelu antény.
5. Vyhodnocení naměřených hodnot a stanovení bezpečných vzdáleností od antény.

## Seznam doporučené odborné literatury:

[1] BALANIS, Constantine A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd Edition. England: Wiley-Interscience, April 4, 2005. ISBN 978-0471667827.

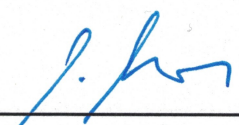
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

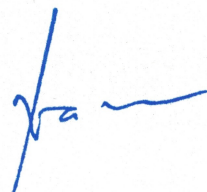
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

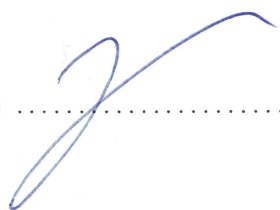


  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

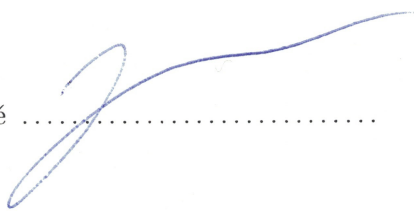
Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární  
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě .....

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'Z' or 'J' shape with a long horizontal stroke extending to the right.

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě .....

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized loop followed by a series of connected, slightly wavy lines extending to the right.



Rád bych poděkoval panu Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Předložená práce se zabývá problematikou elektromagnetického pole v blízké zóně antény. Vliv tohoto pole na lidský, případně jiný živý organismus se stal předmětem zájmů vědců, především díky velkému rozvoji bezdrátových telekomunikačních technologií. Zkoumaný zdroj elektromagnetického vlnění v této práci je elektricky malá smyčková anténa. Cílem práce bylo odsimulování a následné změření elektromagnetického pole v blízké zóně antény a stanovení bezpečných vzdáleností od antény dle Nařízení vlády č. 291/2015, Sb [10]. Stanovení těchto vzdáleností bude sloužit jako pomůcka pro uživatele antény, aby nedošlo k ohrožení jeho zdraví.

**Klíčová slova:** MLA anténa, blízké pole, hygienické limity

## **Abstract**

This thesis deals with the issue of electromagnetic field in the near field zone of the antenna. The impact of this field on human, or other living organisms, has become the subject of scientists' interests, largely due to the large development of wireless telecommunication technologies. The studied source of electromagnetic waves in this work is an electrically small loop antenna. The aim of the thesis is to simulate and subsequently measure the electromagnetic field in the near zone of the antenna and to determine the safe distances from the antenna according to Government Regulation No. 291/2015, Determining these distances will serve as an aid to the antenna user in order not to endanger their health.

**Key Words:** MLA antenna, near field, hygiene limits

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>9</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>12</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>15</b>
<b>Úvod</b>	<b>16</b>
<b>1 Magnetická smyčková anténa</b>	<b>17</b>
1.1 Popis magnetické antény . . . . .	17
1.2 Blízké pole antény . . . . .	19
<b>2 Hygienické limity před neionizujícím zářením</b>	<b>22</b>
2.1 Měrný absorbovaný výkon . . . . .	22
2.2 Nařízení vlády č. 291/2015 Sb. . . . .	22
2.3 Elektromagnetická kompatibilita . . . . .	25
2.4 Účinky elektromagnetického pole . . . . .	30
<b>3 Způsoby měření blízkého pole antény</b>	<b>35</b>
3.1 Senzory využívající Hallův jev . . . . .	35
3.2 Senzory využívající anisotropickou magnetickou resistanci . . . . .	35
3.3 Senzory využívající Giant magnetickou resistanci . . . . .	36
3.4 Senzory využívající tunelovou magnetickou resistanci . . . . .	37
<b>4 Analýza smyčkové antény</b>	<b>40</b>
4.1 Simulace blízkého pole magnetické smyčkové antény v prostředí CST . . . . .	42
4.2 Měření blízkého pole antény . . . . .	45
4.3 Validace blízkého pole magnetické smyčkové antény . . . . .	52
<b>5 Stanovení bezpečných vzdáleností od magnetické smyčkové antény</b>	<b>56</b>
<b>6 Závěr</b>	<b>61</b>
<b>Literatura</b>	<b>63</b>
<b>Přílohy</b>	<b>65</b>
<b>A Obsah el. přílohy</b>	<b>66</b>

<b>B</b>	<b>Anténa</b>	<b>67</b>
<b>C</b>	<b>Simulace</b>	<b>70</b>
<b>D</b>	<b>Měření</b>	<b>79</b>
<b>E</b>	<b>Grafy</b>	<b>83</b>
<b>F</b>	<b>Tabulky bezpečných vzdáleností</b>	<b>95</b>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	– Význam
2/3D	– Dvou/tří rozměrné
AMR	– Anisotropic MagnetoResistive
BTS	– Base Transceiver Station
CST	– Computer Simulation Technology
ČSN	– Česká technická norma
EMC	– Electromagnetic Compatibility
EMI	– Electromagnetic Interference
EMS	– Electromagnetic Susceptibility
EN	– Evropská norma
GMR	– Giant MagnetoResistive
IRPA	– International Radiation Protection Association
LTE	– Long Term Evolution
MLA	– Magnetic Loop Antenna
PSV	– Poměr Stojatých Vln
SAR	– Specific Absorption Rate
Sb.	– Sbírka zákonů
SMA	– SubMiniature version A
TEM	– Transverzální elektromagnetická vlna
TMR	– Tunnel–Magnetoresistance
WiFi	– Wireless Fidelity
Symbol	– Popis
A	– Ampér
A-B-C	– Osa A/B/C
B	– Magnetická indukce [T]
$B^{limit}$	– Limit magnetické indukce
$cm^2$	– Centimetr čtvereční
D	– Největší rozměr antény [m]
d	– Tloušťka [m]
dBm	– Decibel miliwatt
dBi	– Zisk ideální izotropní antény
dm	– Množství látky [kg]
dW	– Množství energie [W]

$E$	– Intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]
$E^{limit}$	– Limit intenzity elektrického pole
$F_m$	– Magnetická síla [N]
$f$	– Frekvence [Hz]
GHz	– Gigahertz
H	– Intenzita magnetického pole [ $A \cdot m^{-1}$ ]
Hz	– Hertz
I	– Elektrický proud [A]
$I_c^{limit}$	– Limit kontaktního proudu
J	– Joule
kg	– Kilogram
kHz	– Kilohertz
km	– Kilometr
LC	– Inductor Capacitor circuit
MHz	– Megahertz
m	– Metr
mm	– Milimetr
mT	– Mili Tesla
$m^2$	– Metr čtverečný
$m^3$	– Metr krychlový
n	– Počet nábojů [-]
q	– Náboj jednoho nositele náboje [C]
$R_f$	– Rozměr Fresnelovy oblasti
$R_h$	– Hallova konstanta [ $m^3 A^{-1} s^{-1}$ ]
$R_r$	– Rozměr Rayleighové oblasti
S	– Výkonová hustota [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$S^{limit}$	– Limit výkonové hustoty
T	– Tesla
$U_h$	– Hallovo napětí [V]
V	– Volt
W	– Watt
Řecký symbol	– Popis
$\alpha$	– Úhel [°]
$\epsilon_r$	– Relativní permitivita [-]
$\lambda$	– Vlnová délka [m]
$\mu$	– Permeabilita [ $H \cdot m^{-1}$ ]

$\mu_r$	– Relativní permeabilita [-]
$\mu s$	– Mikrosekunda
$\pi$	– Matematická konstanta [-]
$\rho$	– Hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\sigma$	– Vodivost [S/m]



## Seznam obrázků

1.1	Magnetická anténa - konstrukce (vlevo), náhradní obvod (vpravo) [1]	18
1.2	Budící obvody [1]	18
1.3	Reaktanční, zářivá a vzdálená oblast antény	20
2.1	Referenční úrovně elektrického pole	24
2.2	Referenční úrovně magnetického pole	24
2.3	Blokové schéma přenosu rušení [11]	27
2.4	Definice úrovní a mezí vyzařování a odolností [11]	29
2.5	Oteplení vybraných tkání v závislosti na době expozice [17]	31
2.6	Frekvenční závislost absorbovaného výkonu [16]	32
3.1	Princip snímače s Hallovým jevem [24]	36
3.2	Závislost změny odporu na intenzitě magnetického pole [25]	37
3.3	Souhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru [26]	38
3.4	Nesouhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru [26]	38
4.1	MLA anténa 21 MHz (plná velikost v příloze B.1)	40
4.2	Laditelná kapacita antény (plná velikost v příloze B.2)	41
4.3	Gama pahýl antény (plná velikost v příloze B.3)	41
4.4	Namodelovaná MLA anténa v programu CST (plná velikost v příloze C.1)	42
4.5	Simulace S11 MLA antény (plná velikost v příloze C.2)	43
4.6	Směrová charakteristika - CST (plná velikost v příloze C.3)	43
4.7	Složka E - 3D pohled	44
4.8	Složka H - 3D pohled	45
4.9	Výpočet SAR	46
4.10	Průběh S11 - měření	46
4.11	Vektorový obvodový analyzátor DG8SAQ	47
4.12	Signálový generátor SMLH	47
4.13	Narda EMR-20	48
4.14	Průběh S11 - měření v otevřeném prostoru (plná velikost v příloze D.1)	49
4.15	Plán měření	50
4.16	Závislost elektrického pole E na vzdálenosti od antény v ose A (plná velikost v příloze E.1)	50
4.17	Závislost magnetického pole H na vzdálenosti od antény v ose A (plná velikost v příloze E.2)	51
4.18	Závislost elektrického pole E na vzdálenosti od antény v ose B	51
4.19	Závislost magnetického pole H na vzdálenosti od antény v ose B (plná velikost v příloze E.4)	52

4.20	Elektrické pole před anténou simulace CST (plná velikost v příloze E.5)	52
4.21	Elektrické pole před anténou změřeno (plná velikost v příloze E.6)	53
4.22	Magnetické pole před anténou simulace CST (plná velikost v příloze E.7)	54
4.23	Magnetické pole před anténou změřeno (plná velikost v příloze E.8)	54
5.1	Tvar elektrického pole po začlenění hygienického limitu	57
5.2	Tvar magnetického pole po začlenění hygienického limitu	58
5.3	Srovnání elektrického pole ve výšce kapacity a středu antény	58
5.4	Závislost výkonů na bezpečné vzdálenosti od antény	59
5.5	Aproximovaná závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti od antény (plná velikost v příloze E.12)	60
B.1	MLA anténa 21 MHz	67
B.2	Laditelná kapacita antény	68
B.3	GAMA pahýl antény	69
C.1	Namodelovaná MLA anténa	70
C.2	Simulace S11 MLA antény	71
C.3	Směrová charakteristika	72
C.4	Složka E horizontální řez	73
C.5	Složka E vertikální řez	74
C.6	Složka E 100 mm před anténou	75
C.7	Složka H horizontální řez	76
C.8	Složka H vertikální řez	77
C.9	Složka H 100 mm před anténou	78
D.1	Průběh S11 v otevřeném prostoru	79
D.2	Měření osy A	80
D.3	Měření osy B	81
D.4	Měření půl metru před anténou	82
E.1	Závislost elektrického pole na vzdálenosti od antény osa A	83
E.2	Závislost magnetického pole na vzdálenosti od antény osa A	84
E.3	Závislost elektrického pole na vzdálenosti od antény osa B	85
E.4	Závislost magnetického pole na vzdálenosti od antény osa B	86
E.5	Složka E 0,5 m před anténou CST	87
E.6	Složka E 0,5 m před anténou změřeno	88
E.7	Složka H 0,5 m před anténou změřeno	89
E.8	Složka H 0,5 m anténou změřeno	90
E.9	Závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti složka E	91
E.10	Závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti složka H	92
E.11	Závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti	93

E.12 Aproximovaná závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti . . . . .	94
--	----

## Seznam tabulek

2.1	Frekvenční průběhy veličny $E^{limit}$ (efektivní hodnoty) . . . . .	25
2.2	Frekvenční průběhy veličny $B^{limit}$ (efektivní hodnoty) . . . . .	25
2.3	Frekvenční průběhy veličny $S^{limit}$ . . . . .	25
2.4	Frekvenční průběhy veličny $I_c^{limit}$ (efektivní hodnoty) . . . . .	26
5.1	Referenční hodnoty pro frekvenci 21 MHz . . . . .	56
F.1	Referenční hodnoty bezpečné vzdálenosti od antény pro jednotlivé výkony . . . .	95
F.2	Bezpečný výkon v závislosti na vzdálenosti od antény . . . . .	96

### Úvod

Elektromagnetické vlnění je nedílnou součástí prostředí okolo nás. Ať už se jedná o gama záření, infračervené záření, viditelné světlo nebo o rádiové vlny a mikrovlny. Právě u rádiových vln, případně i u mikrovln došlo s koncem 20. století k obrovskému rozmachu umělých zdrojů záření v souvislosti s rozvojem různých bezdrátových technologií, jako například mobilní telefony nebo bezdrátové internetové připojení. Tyto technologie přináší do života lidí značnou komfortnost, ale také u některých značné obavy o své zdraví.

Tím, že člověk nemůže přítomnost rádiové vlny poznat zrakem nebo pocitem, se objevují spekulace, zda některé zdroje tohoto záření nemohou způsobovat zdravotní potíže. Tyto obavy skupiny obyvatelstva se zesilují s různými médií, které občas přijdou s vědecky nepodloženou informací, že zdroje elektromagnetického záření poškozují zdraví, způsobují nespavost nebo bolesti hlavy, i když hodnoty záření nejsou nadlimitní.

V první kapitole této práce jsou základní informace o elektricky malé smyčkové anténě. Například rozdělení smyčkových antén, základní části elektricky malé smyčkové antény s jejich popisem a vybrané způsoby buzení antény. Protože se práce zabývá hygienickými limity v blízkém poli antény, je zde uvedený popis tohoto pole.

Následující kapitola se zabývá legislativou, která určuje mezní limity pro elektromagnetické záření. Uveden je výňatek nařízení vlády, který definuje základní pojmy v této problematice a stanovuje přesné mezní limity pro jednotlivé frekvenční intervaly elektromagnetického záření. Další část této kapitoly se zabývá problematikou elektromagnetické kompatibility. Zařazení této problematiky je potřebné proto, že některé osoby mohou mít implantovaný elektrický zdravotní přístroj, který může být ovlivněn elektromagnetickým zářením v blízkém poli elektricky malé smyčkové antény. V poslední části této kapitoly jsou popsány biologické účinky elektromagnetického záření. Tyto účinky jsou nejdříve rozděleny na základní části a poté popsány.

Další kapitola je zaměřena na způsoby měření blízkého pole. Jsou zde objasněny principy jednotlivých senzorů magnetického pole. U jednotlivých senzorů jsou popsány oblasti využití a s tím související výhody a nevýhody jednotlivých senzorů.

Předposlední kapitola popisuje simulaci elektricky malé smyčkové antény v program CST Studio Suite (Computer Simulation Technology). Jsou zde zobrazeny vypočtené výsledky blízkého pole antény a také jejich závislost na vzdálenosti od antény. Tato kapitola se také zabývá výpočtem měrného absorbovaného výkonu. Poslední část čtvrté kapitoly je zaměřena na praktické měření blízkého pole elektricky malé smyčkové antény.

Poslední, pátá kapitola, se zabývá stanovením hygienických limitů blízkého pole antény. Jsou zde uvedeny bezpečné vzdálenosti od antény v závislosti na výkonu.

## 1 Magnetická smyčková anténa

Magnetická smyčková anténa (MLA - Magnetic Loop Antenna) patří mezi smyčkové antény. Ty dělíme na:

- elektricky velké,
- elektricky malé,
- feritové antény.

MLA je řazena mezi elektricky malé antény, protože obvod smyčky je mnohonásobně menší než vlnová délka, na kterou je anténa navržena. Nyní budou popsány základní části MLA antény.[1], [2]

### 1.1 Popis magnetické antény

MLA anténa se skládá ze tří základních částí:

- hlavní smyčka,
- ladící kondenzátor (pro případ potřeby přeladění smyčky),
- vazební obvod.

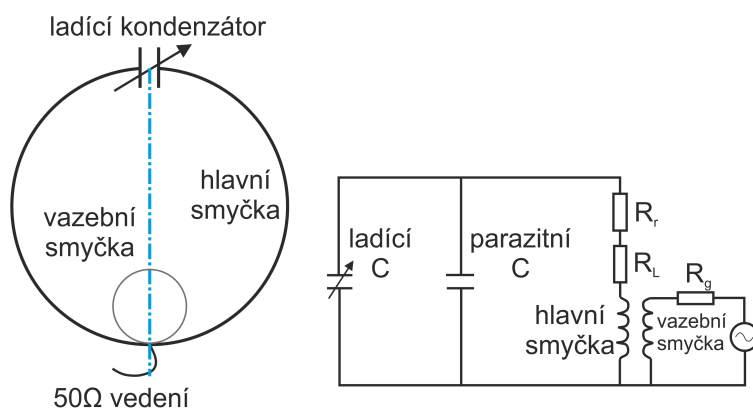
[1], [2]

#### 1.1.1 Hlavní smyčka

Jedná se o hlavní prvek antény. Obvod této smyčky je odvozen z vlnové délky (obvykle  $0,1$  až  $0,3 \lambda$ ), pro kterou je anténa navržena. Smyčka může mít různé tvary, například čtverec, trojúhelník, šestiúhelník nebo kruh. Smyčka obsahuje jeden nebo i více závitů z vodivého materiálu, například silnější vodič, měděná trubka nebo koaxiální kabel. Navrhuje-li se anténa na pásma s větší vlnovou délkou, je dobré použít více závitů smyčky, čímž se docílí menší prostorové náročnosti antény. [1], [2]

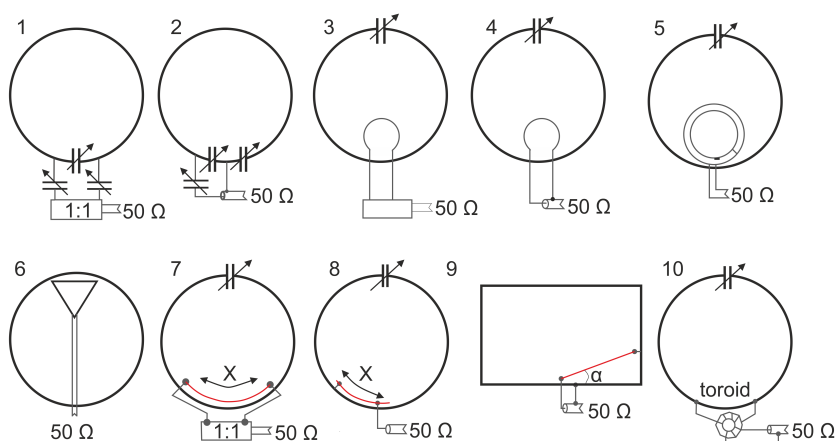
#### 1.1.2 Ladící kondenzátor

Jelikož můžeme MLA anténu přirovnat k LC obvodu, kde indukčnost  $L$  tvoří hlavní smyčka, pak ladící kondenzátor je nezbytnou součástí antény. Tento kondenzátor umožňuje do určité míry změnu pracovní frekvence. Jak moc můžeme anténu přeladit, nám určuje hodnota daného kondenzátoru nebo délka hlavní smyčky. Není-li třeba anténu přeladovat, může se použít pevný kondenzátor o určité kapacitě a dielektrické pevnosti. Bude-li anténa využívána jako vysílací, jsou nároky na tento kondenzátor větší, protože hlavní smyčka představuje otevřený závit na prázdko. Na konci smyčky se může objevit vysoké napětí.[1], [2]



Obrázek 1.1: Magnetická anténa - konstrukce (vlevo), náhradní obvod (vpravo) [1]

### 1.1.3 Vazební obvod



Obrázek 1.2: Budící obvody [1]

Vazební obvod, nebo také budící obvod, může být vytvořen několika způsoby. Nejpoužívanější varianty jsou zobrazeny na obr. 1.2 a dále jsou některé stručně popsány.

- Buzení pomocí indukční vazby (obrázek 1.2–3..6)

Jedna z oblíbených variant budícího obvodu je tvořena malou vazební smyčkou, která je zpravidla umístěna uvnitř nebo vně hlavní smyčky. Umístění a poloha této vazební smyčky vůči hlavní smyčce má vliv pouze na výstupní impedanci antény. V případě variaty 6 se jedná o tzv. triangle, který se doladuje změnou poměru stran trojúhelníku.



- Buzení pomocí GAMA pahýlu (obrázek 1.2–7..9)  
U tohoto buzení se připojí stínění koaxiálního kabelu, ke kterému je anténa připojena k hlavní smyčce. Střední vodič koaxiálního kabelu je protažen a kopíruje tvar hlavní smyčky. Konec vodiče je zkratován na hlavní smyčku, kde umístění zkratu ovlivňuje impedanci antény. Varianta 9 se výhradně používá pro úhlové tvary a doladuje se pomocí změny úhlu  $\alpha$ .
- Buzení pomocí toroidního transformátoru (obrázek 1.2–10)  
K buzení antény se využívá toroidní proudový transformátor. Typ toroidu má vliv na konečné přizpůsobení antény a její ztráty.
- Buzení pomocí kapacitního děliče (obrázek 1.2–1,2).

[2]

## 1.2 Blízké pole antény

Uspořádání elektromagnetického pole okolo antény je odlišné v závislosti na vzdálenosti od antény. Proto jsou definovány tři základní oblasti:

- blízká reaktanční oblast,
- blízká zářivá oblast,
- vzdálená oblast.

[3]

Blízká reaktanční oblast je někdy nazývána jako Rayleighova oblast. Jedná se o oblast, která je umístěná nejbližší antény. V ní neexistuje transverzální elektromagnetická vlna (TEM) a intenzita elektrického a magnetického pole rychle klesá se vzdáleností. Tato oblast je definována: [4]

$$R_r < 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}. \quad (1.1)$$

Pro elementární dipol je možné vztah zjednodušit: [4]

$$R_r < \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1.2)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka a  $D$  označuje největší rozměr antény. [5]

Blízká zářivá oblast nazývaná také Fresnelova oblast. Zde již existuje TEM vlna. Je definována od reaktanční oblasti po: [4]

$$R_f < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.3)$$

kde  $D > \lambda$ , pro případ kdy  $D < \lambda$  platí: [4]

$$R_f < \frac{2D^2}{\lambda} + \lambda \quad (1.4)$$

Vzdálená oblast, nebo také Fraunhoferova oblast. V této oblasti jsou složky elektrického a magnetického pole ve fázi a přenáší se pouze činný výkon.



Obrázek 1.3: Reaktanční, zářivá a vzdálená oblast antény

Na obrázku 1.3 vidíme pro lepší přehled jednotlivé zóny ve dvourozměrném prostoru, ve skutečnosti se jedná o kulové oblasti a vypočtené vzdálenosti jednotlivých oblastí pro měřenou anténu, která pracuje na 21 MHz. [3], [5]

### 1.2.1 Veličiny popisující elektromagnetické záření

Elektromagnetické pole je jednoznačně charakterizováno dvěma vektorovými veličinami. První je vektor intenzity elektrického pole  $E$  a druhá je vektor intenzity magnetického pole  $H$ . Zdrojem elektrického pole jsou elektrické náboje a zdrojem magnetického pole je elektrický proud nebo také vlastní magnetické momenty elektronů, které se především projevují u feromagnetických látek. [6]

#### 1.2.1.1 Intenzita elektrického pole

Označuje se  $E$  a jednotkou je volt na metr  $[V \cdot m^{-1}]$ . Elektrické pole, které se rovná  $1 V \cdot m^{-1}$ , je vytvořeno mezi dvěma rovnoběžnými, nekonečně rozměrnými, vodivými deskami, které jsou vzdálené od sebe jeden metr a je na ně přivedeno elektrické napětí o velikosti 1 V. Kolem

zemského povrchu se za normálního počasí udržuje  $E$  o velikosti přibližně  $140 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ . Elektrický průraz vzduchu nastává při elektrické intenzitě, která má velikost okolo  $3 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ . [6]

#### 1.2.1.2 Intenzita magnetického pole a magnetická indukce

Intenzita magnetického pole se označuje  $H$ , jednotkou je ampér na metr  $[\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$ . Častěji se ale pro charakteristiku magnetického pole využívá magnetická indukce, která se označuje  $B$ , jednotkou je Tesla  $[\text{T}]$ . Převod mezi těmito jednotkami je určen vztahem: [6]

$$B = \mu \cdot H, \quad (1.5)$$

kde  $\mu$  je permeabilita prostředí. Jednotka Tesla je sama o sobě poměrně velká. Magnetické pole s indukcí větší než  $1 \text{ T}$  se vyskytuje jen ve speciálních aplikacích, jako například v lékařské diagnostice. Geomagnetické pole v naší zeměpisné šířce má hodnotu okolo  $50 \mu\text{T}$ . [6]

#### 1.2.1.3 Výkonová hustota

Označení výkonové hustoty je  $S$ . Využívá se pro vyjádření energie přenášené elektromagnetickou vlnou. Vyjadřuje výkon, kterým je přenesena elektromagnetická vlna plochou o rozměru  $1 \text{ m}^2$  kolmo na směr šíření. Výkonovou hustotu můžeme vypočítat dle: [6]

$$S = E \cdot H, \quad (1.6)$$

kde jednotkou výkonové hustoty je watt na metr čtvereční  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ . Tato jednotka je dost malá, například výkonová hustota slunečního svitu při zemském povrchu dopadající kolmo na rovinnou plochu je cca  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . [6]

## 2 Hygienické limity před neionizujícím zářením

V současné době je platným legislativním opatřením, dle kterého se Česká republika řídí, v oblasti ochrany veřejného zdraví před neionizujícím zářením nařízení vlády číslo 291/2015 Sb. [10] ze dne 5. října 2015, které novelizuje starší nařízení vlády č. 106/2010 Sb.. [7]

Protože v nařízení vlády se velmi často mluví o měrném absorbovaném výkonu (SAR), bude v následující kapitole popsán tento parametr.

### 2.1 Měrný absorbovaný výkon

Častěji pojmenovaný jako SAR (Specific Absorption Rate). Vyjadřuje množství záření, které absorbuje hmota s definovanými vlastnostmi. Jedná-li se o problematiku antén, tak SAR říká, kolik záření (elektromagnetického vlnění) z antény pronikne do lidského těla. Jednotka SAR je W/kg. Prahovou hodnotou jsou 4 W/kg, kde při této hodnotě dojde k ohřevu tkáně o 1 °C. SAR je možné vypočítat dle: [9]

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\rho} \frac{dW}{dm} \right) [W/kg], \quad (2.1)$$

kde  $dW$  je množství energie,  $dm$  je množství látky a  $\rho$  je hustota látky. [8]

### 2.2 Nařízení vlády č. 291/2015 Sb.

Toto nařízení vlády z roku 2015 zpracovává a upravuje nejvyšší přípustné hodnoty neionizujícího záření ve frekvenční oblasti od 0 Hz do  $1,7 \cdot 10^{15}$  Hz pro zaměstnance a fyzické osoby v komunálním prostředí. Také se zabývá hodnocením expozice osoby v záření, minimálním rozsahem informací o ochraně zdraví při práci a rozsahem opatření k ochraně zdraví zaměstnance. Neionizujícím zářením se v tomto vyhlášení rozumí statická, elektrická, magnetická a časově proměnná elektromagnetická pole a elektromagnetická záření z umělých zdrojů. Nejvyšší přípustnou hodnotou se rozumí takové mezní hodnoty, které vychází přímo z prokázaných účinků na zdraví a z údajů o jejich biologickém působení a jejichž nepřekročení zaručuje, že zaměstnanci a fyzické osoby, exponované neionizujícímu záření, jsou chráněny proti všem jeho známým přímým biofyzikálním i nepřímým účinkům. Referenčními hodnotami velikosti se myslí přímo měřitelné parametry neionizujícího záření ve frekvenční oblasti od 0 Hz do  $3 \cdot 10^{11}$  Hz, kterými jsou intenzita elektrického pole, magnetická indukce, hustota zářivého toku a kontaktní proud. Ty slouží k jednoduššímu prokazování nepřekročení nejvyšších přípustných hodnot.

Zjišťování expozice neionizujícího záření se provádí výpočtem nebo měřením modifikované intenzity elektrického pole indukovaného v těle exponované osoby, měrného absorbovaného výkonu v těle exponované osoby (SAR), hustoty zářivého toku a spektrální záře, intenzity

elektrického pole, magnetické indukce nebo kontaktního proudu. Nepřesazení referenčních hodnot zaručuje, že nejsou překročeny nejvyšší přípustné hodnoty. V případě, že z porovnání vypočtených nebo měřených hodnot příslušných veličin vyplýne, že referenční hodnoty jsou přesahovány, musí být výpočtem nebo měřením prokázáno, že nebude docházet k překračování nejvyšších přípustných hodnot. Při hodnocení expozice dovoluje nařízení zohlednit také přímé biofyzikální účinky, intenzitu záření, frekvenční spektrum, trvání a typ expozice. Zmíněné nařízení dovoluje také zohlednit i nepřímé biofyzikální účinky, jako například rušení elektronických přístrojů a záření, včetně kardiostimulátorů a jiných elektronických zdravotnických prostředků. Nařízení vlády se nevztahuje na pacienty, kteří jsou při poskytování zdravotní služby exponováni, dále se nevztahuje na spotřebitele, kteří jsou vědomě a dobrovolně exponováni zářením při používání speciálních přístrojů k péči o tělo. [10]

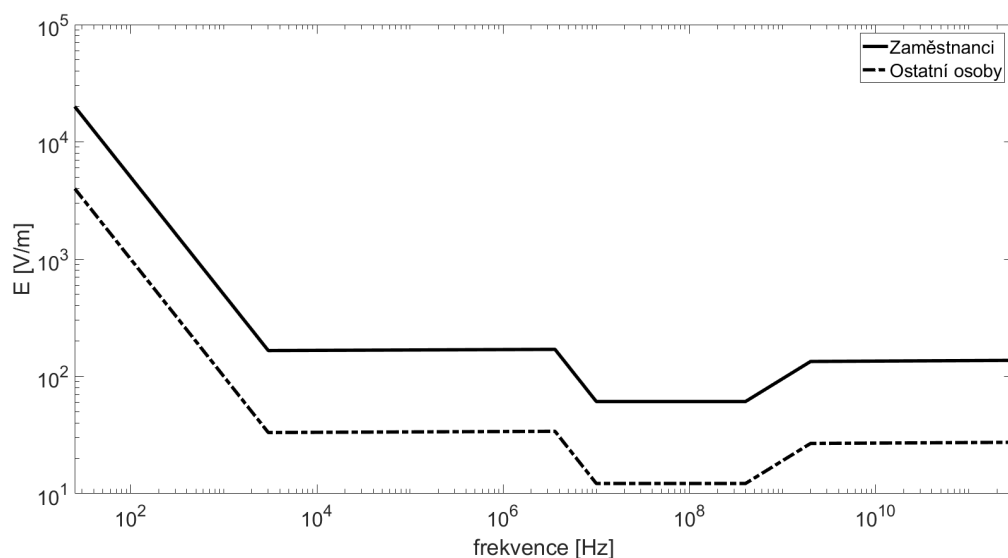
### 2.2.1 Referenční a nejvyšší přípustné hodnoty dle č. 291/2015 Sb.

Nejvyšší přípustná hodnota pro elektrické a magnetické pole s frekvencí nižší než 1 Hz je dána špičkovou hodnotou intenzity elektrického pole  $\sqrt{2} \cdot 20000 \text{ V/m}$  pro zaměstnance a  $\sqrt{2} \cdot 5000 \text{ V/m}$  pro fyzické osoby. Nejvyšší přípustná hodnota magnetické indukce pro expozici hlavy nebo hrudi je 2 T pro zaměstnance a 0,4 T pro fyzické osoby. V případě proškolených zaměstnanců je možné připustit expozici magnetickému poli se špičkovou hodnotou magnetické indukce až na 8 T, která je rovněž referenční hodnotou pro expozici končetiny zaměstnance. Referenční hodnota pro expozici fyzické osoby není stanovena.

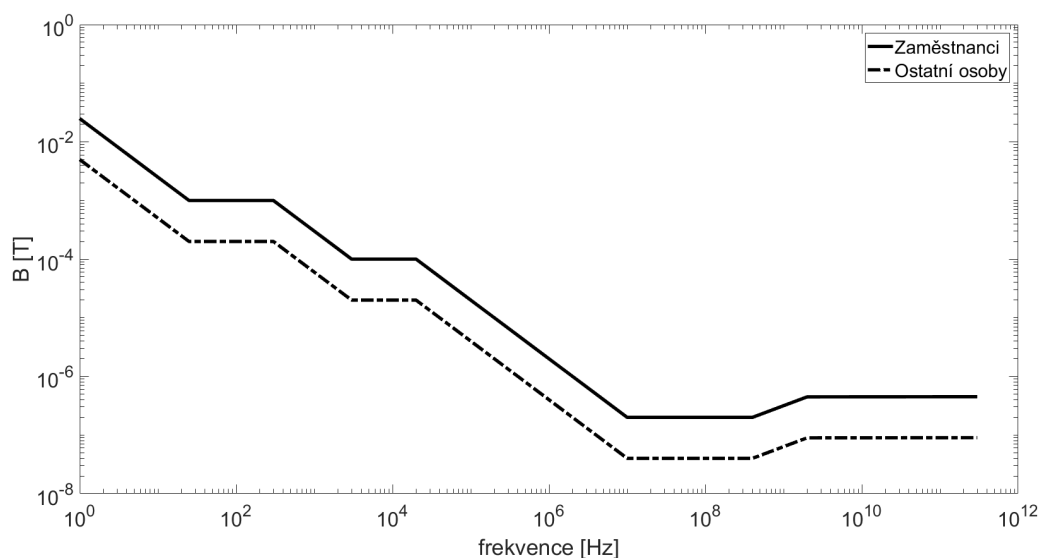
Nejvyšší přípustná hodnota pro účinky způsobené elektromagnetickým polem v intervalu 1 Hz až 10 MHz je dána modifikovanou intenzitou elektrického pole  $E_{mod}(t)$  indukovaného v tkáni, což je intenzita elektrického pole modifikována lineárním filtrem  $G(f)$ . Velikost modifikované intenzity elektrického pole  $E_{mod}(t)$  nesmí překročit hodnotu 1 V/m pro zaměstnance a 0,2 V/m pro fyzické osoby v komunálním prostředí.

Maximální přípustná hodnota pro frekvenci od 100 kHz do 6 GHz pro celotělovou expozici  $SAR = 0,4 \text{ W/kg}$  pro zaměstnance a pro fyzické osoby  $0,08 \text{ W/kg}$ . Při lokální expozici je hodnota  $SAR = 10 \text{ W/kg}$  pro zaměstnance a  $2 \text{ W/kg}$  pro ostatní osoby. U expozice končetin je to ještě dvojnásobná hodnota, tedy  $20 \text{ W/kg}$  pro zaměstnance a  $4 \text{ W/kg}$  pro fyzické osoby. Při expozici lidské hlavy v impulsním elektromagnetickém poli ve frekvenčním pásmu 0,3 do 6 GHz s pulzy o délce kratší než  $30 \mu\text{s}$  je nejvyšší přípustná hodnota  $0,01 \text{ J/kg}$  pro zaměstnance a  $0,002 \text{ J/kg}$  pro fyzické osoby. Tato nejvyšší přípustná hodnota slouží k vyloučení akustických efektů popsanych níže.

Nařízení také definuje nejvyšší přípustné hodnoty ve frekvenčním pásmu od 6 GHz do 300 GHz, kde nejvyšší přípustná hodnota je definována pomocí časově střední hodnoty hustoty zářivého toku  $50 \text{ W/m}^2$  pro zaměstnance a  $10 \text{ W/m}^2$  pro fyzické osoby. Při hodnocení expozice



Obrázek 2.1: Referenční úrovně elektrického pole



Obrázek 2.2: Referenční úrovně magnetického pole

se provádí plošné průměrování přes každých 20  $cm^2$  exponované části těla, přičemž maximum hustoty zářivého toku průměrované přes každých 1  $cm^2$  nesmí překročit přes 1000  $W/m^2$  pro zaměstnance a 200  $W/m^2$  pro fyzické osoby v komunálním prostředí.

Jsou zavedeny referenční hodnoty pro intenzitu elektrického pole  $E$ , magnetickou indukci  $B$ , hustotu zářivého toku  $S$  a kontaktní proud  $I_c$  s cílem zjednodušit posouzení expoziční situace. Referenční hodnoty jsou definovány pomocí veličin  $E^{Limit}$ ,  $B^{Limit}$ ,  $S^{Limit}$ ,  $I_c^{Limit}$ ,

uvedených v tabulkách 2.1–2.4. Aby nebyla překročena referenční hodnota, je třeba splnit následující kritéria při  $H_{lim} = 1$  pro zaměstnance a  $H_{lim} = 0,2$  pro fyzické osoby. Závislost  $E^{Limit}$  a  $B^{Limit}$  na frekvenci je možné vidět na grafu 2.1 a na 2.2, kde plná čára představuje referenční hodnotu pro zaměstnance a čerchovaná pro ostatní osoby v komunálním prostředí. [10]

Tabulka 2.1: Frekvenční průběhy veličny  $E^{limit}$  (efektivní hodnoty)

f [Hz]	$E^{limit}$ [V/m]
0 – 25	20 000
25 – 3000	$5 \cdot 10^5 / f$
3000 – $3,6 \cdot 10^6$	170
$3,6 \cdot 10^6$ – $10^7$	$6,1 \cdot 10^8 / f$
$10^7$ – $4 \cdot 10^8$	61
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$0,003 \cdot f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	137

Tabulka 2.2: Frekvenční průběhy veličny  $B^{limit}$  (efektivní hodnoty)

f [Hz]	$B^{limit}$ [T]
0 – 1	0,025
1 – 25	$0,025 / f$
25 – 300	$10^{-3}$
300 – 3000	$0,3 / f$
3000 – $2 \cdot 10^4$	$10^{-4}$
$2 \cdot 10^4$ – $10^7$	$2 / f$
$10^7$ – $4 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{-7}$
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$10^{-11} f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$

## 2.3 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita, nebo také slučitelnost EMC (Electromagnetic Compatibility), udává schopnost přístroje, zařízení nebo systému vytvářet správnou činnost v prostředí,

Tabulka 2.3: Frekvenční průběhy veličny  $S^{limit}$

f [Hz]	$S^{limit}$ [W/m <sup>2</sup> ]
$10^7$ – $4 \cdot 10^8$	10
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$f / 4 \cdot 10^7$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	50



Tabulka 2.4: Frekvenční průběhy veličny  $I_c^{limit}$  (efektivní hodnoty)

f [Hz]	$I_c^{limit}$ [A]
$0 - 2,5 \cdot 10^3$	$10^{-3}$
$2,5 \cdot 10^3 - 10^5$	$4 \cdot 10^{-7} \cdot f$
$10^5 - 10^8$	0,04

jenž je ovlivněno i jinými zdroji elektromagnetického signálu. EMC také svou vlastní elektromagnetickou činností neovlivňuje své okolí např. vyzařováním rušivých signálů. S prudkým rozvojem elektroniky narůstá i počet zdrojů elektromagnetického rušení. Při zkoumání elektromagnetické kompatibility se také nesmí zapomenout na to, že každý systém, přístroj nebo zařízení je přijímačem a zároveň i vysílačem elektromagnetického rušení. [11]

### 2.3.1 Základní pojmy elektromagnetické kompatibility

Problematika EMC zahrnuje velice širokou oblast a je ji možné rozdělit na dvě části: [11]

- Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů,
- Elektromagnetická kompatibilita technických systémů a zařízení.

Dále můžeme EMC rozdělit do dvou odvětví, a to: [11]

- Elektromagnetická interference,
- Elektromagnetická susceptibilita.

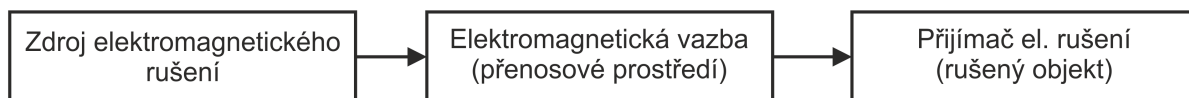
#### 2.3.1.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

EMC biologických systémů provádí výzkum a sleduje vliv elektromagnetických vln na životní prostředí a na živé organismy. Biologické účinky pole závisí na době působení, charakteru pole (frekvence) a také na vlastnostech organismu. Přestože se tyto účinky zkoumají již mnoho let, nejsou závěry pozorování jednoznačné, protože reakce každého jedince je individuální. Velké množství studií se zaměřuje na působení elektromagnetického pole při výkonu práce. Posuzování působení elektromagnetického pole v běžném prostředí jako v domácnosti je opomíjeno. Při prozkoumávání problematiky EMC bylo zjištěno, že při vysokofrekvenčním a mikrovlnném záření s velkým výkonem mají za důsledek tzv. tepelné účinky. Při nižším výkonu působí především tzv. netepelné účinky na nervový, cévní i imunitní systém. [11]

#### 2.3.1.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů a zařízení

Druhá základní oblast EMC se zabývá vzájemným působením a koexistencí technických prostředků, zejména elektrotechnických a elektronických přístrojů a zařízení. Při zkoumání EMC

systému nebo zařízení se vychází ze základního řetězce EMC obr. 2.3. V obecném případě se EMC zabývá všemi znázorněny prvky, které mají vliv na rušení.



Obrázek 2.3: Blokové schéma přenosu rušení [11]

- Zdroje rušení - EMC se zabývá příčinou vzniku rušení, jeho charakterem a intenzitou. Zdroje rušení lze podle původu rozdělit na přírodní a umělé.
- Přenosové prostředí - sleduje způsob šíření rušení od zdroje k přijímači rušení
- Přijímač rušení - zaměřeno na klasifikaci účinků rušení, stanovení odolnosti záření, jeho konstrukčních prvků nebo naměřených charakteristik.

Základní princip přenosu rušení je velice zjednodušený, ve skutečnosti je velice obtížné určit nejen zdroj rušení, ale také rušený objekt, protože každý objekt je většinou přijímačem a zdrojem rušení zároveň. [11]

#### 2.3.1.3 Elektromagnetická interference

Elektromagnetická interference, zkráceně EMI, někdy nazývána také jako elektromagnetické rušení, je proces, při kterém se signál z rušivého zdroje šíří prostřednictvím elektromagnetické vazby až k rušenému systému. EMI se primárně zabývá identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a v neposlední řadě identifikací nežádoucích přenosových cest. EMI zajišťuje kompatibilitu celého systému tím, že omezuje vznik rušení u vysílače, nebo utlumuje šíření rušivého signálu. EMI se hlavně zabývá příčinou rušení a jeho odstraněním nebo omezením. [11]

#### 2.3.1.4 Elektromagnetická susceptibilita

Elektromagnetická susceptibilita (EMS), česky nazývaná elektromagnetická citlivost nebo odolnost. EMS vyjadřuje schopnosti systému nebo zařízení pracovat bezchybně nebo s předem definovanou chybou v prostředí, kde se vyskytuje elektromagnetické rušení. EMS se tedy vlastně zabývá hlavně technickým opatřením, které u rušeného objektu zvyšuje jeho odolnost - imunitu proti nechtěnému vnějšímu elektromagnetickému rušení. EMS se narozdíl od EMI zabývá odstraňováním důsledků rušení. [11]

### 2.3.1.5 Kritéria elektromagnetické odolnosti

Při zjišťování elektromagnetické odolnosti systému je vždy nutné předem znát, určit nebo změřit mez narušení jeho funkcí. Obecně se tyto meze definují buď kvantitativně, nebo kvalitativně. Kvantitativní mez odolnosti je stanovena jako dosažení určitých hodnot vybrané veličiny. Tento postup se používá výhradně v etapě vývoje daného zařízení, kdy se zjišťuje velikost a tvar rušivých signálů. Analyticky nebo empiricky se stanoví limitní hodnota sledované veličiny, která by ještě neměla vyvolat nežádoucí změnu stavu elektrotechnického zařízení. Takto určená hodnota je pak považována za kritérium EMC. Pro veřejnost se především používá kvalitativního kritéria. U kvalitativního, neboli funkčního kritéria, se posuzuje změna pracovního stavu nebo ovlivnění funkčnosti daného zařízení. Přípustné funkční poruchy jsou definovány normou. Funkční poruchou je myšlena změna provozní způsobilosti zkoušeného zařízení, tj. zhoršení jeho funkce během zkoušky či jako důsledek zkoušky odolnosti. Rozlišují se tři základní funkční kritéria:

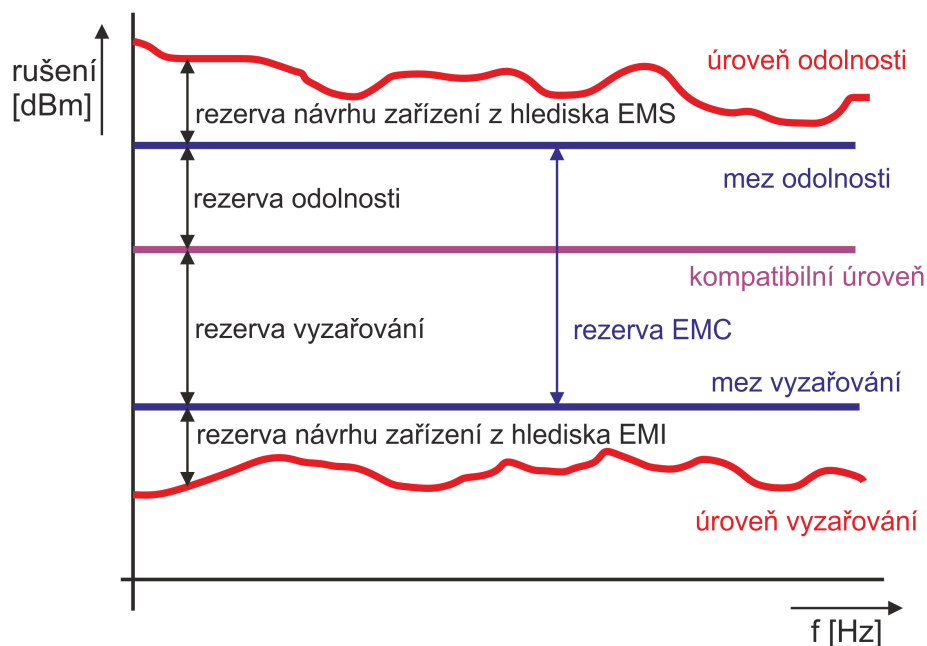
- Funkční kritérium A - zařízení během zkoušky musí pokračovat ve své činnosti dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti nebo ztráta funkce zařízení.
- Funkční kritérium B - zařízení po skončení zkoušky musí pokračovat ve své činnosti dle svého určení. Během zkoušky je dovoleno zhoršení činnosti zařízení, není však dovolena změna aktuálního provozního stavu zařízení ani změna dat v paměti. Po ukončení zkoušky není dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení.
- Funkční kritérium C - je dovolena dočasná ztráta funkčnosti zařízení za předpokladu, že funkčnost zařízení po ukončení zkoušky se obnoví sama, nebo zásahem řídicího systému, nebo zásahem operátora dle návodu.

[11]

### 2.3.1.6 Základní pojmy elektromagnetické kompatibility

Jak již bylo řečeno, každé elektrotechnické zařízení je zdrojem a zároveň přijímačem elektromagnetického rušení. Pro každé takovéto zařízení jsou definovány základní pojmy obr. 2.4. [11]

- Úroveň vyzařování je rušení vygenerované rušícím přístrojem, zařízením a zpravidla vyjádřené např. v dBm v závislosti na frekvenci.
- Mez vyzařování je maximální povolená vyzařovací úroveň daného zařízení. Rozdíl mezi úrovní vyzařování a mezí vyzařování se nazývá rezerva návrhu EMI.
- Úroveň odolnosti je maximální úroveň rušení rušeného zařízení, při kterém nedojde k zhoršení provozu tohoto zařízení.



Obrázek 2.4: Definice úrovní a mezí vyzařování a odolností [11]

- Mez odolnosti je nejnižší normou požadované úroveň odolnosti. Rozdíl mezi úrovní odolnosti a mezí odolnosti se nazývá rezerva návrhu EMS.
- Kompatibilní úroveň je maximální úroveň celkového rušení, o němž se předpokládá, že bude ovlivňovat funkci přístroje. Rozdíly mezi vyzařování a odolností vůči této mezi se označují jako rezerva vyzařování nebo rezerva odolnosti.

### 2.3.2 Zdravotnické elektrické přístroje

V následující podkapitole bude popsána problematika funkčnosti kardiostimulátoru v elektromagnetickém poli. Informace, které obdrží člověk, jemuž byl implantován kardiostimulátor, říkají, že funkci tohoto elektrického zdravotnického přístroje může narušit jakékoliv silnější magnetické nebo elektromagnetické pole. Proto je v informacích doporučováno pacientovi, aby se vyhýbal místům, kde se nachází magnetické nebo elektromagnetické pole, nebo neprovazoval činnosti, jako např. sváření elektrickým obloukem, elektroléčba, magnetická rezonance. Doporučuje se mít také telefonní zařízení umístěné nejbližší 100 mm od implantovaného přístroje. V odbornější literatuře se potom dočítáme, že reakce kardiostimulátorů na magnetické nebo elektromagnetické pole nelze jednoznačně určit, protože silně závisí na charakteru a síle ovlivňujícího pole. Také záleží na fyzických vlastnostech

pacienta (štíhlý, obézní, sportovní typ). V odborných pracích zabývajících se měřením elektromagnetického pole, které způsobí nefunkčnost kardiostimulátorů, lze vidět hodnoty pole, které způsobí jejich nefunkčnost. Takovéto hodnoty jsou velmi vysoké, v normálním každodenním životě až nedosažitelné. [12] Odborná literatura a informační materiály výrobců kardiostimulátorů se zaměřují na technologický popis problému, tj. popisují, co se stane, když vnější rušivé magnetické nebo elektromagnetické pole nadměru zaruší kardiostimulátor. Také se objevuje rozdělení signálů kardiostimulátorů do dvou skupin: [13], [14]

- fyziologické - klasifikují se zde signály s frekvencí menší než 16 Hz,
- nefyziologické - signály s frekvencí větší než 16 Hz.

V České republice existuje norma pro zdravotnické elektrické přístroje ČSN EN 6061 - 1. [15] V této normě však jsou pouze všeobecné požadavky na základní bezpečnost a nezbytnou funkčnost. Nejsou však zde uvedeny žádné konkrétní limity, u kterých by jejich překročení znamenalo ohrožení na životě vlivem špatně fungujícího kardiostimulátoru. Organizace IRPA (Mezinárodní sdružení pro ochranu před zářením) stanovila jedinou mezní hodnotu magnetické hustoty 5 T, jež je určena pro 50/60 Hz pole, nacházející se v rozvodné síti.

## 2.4 Účinky elektromagnetického pole

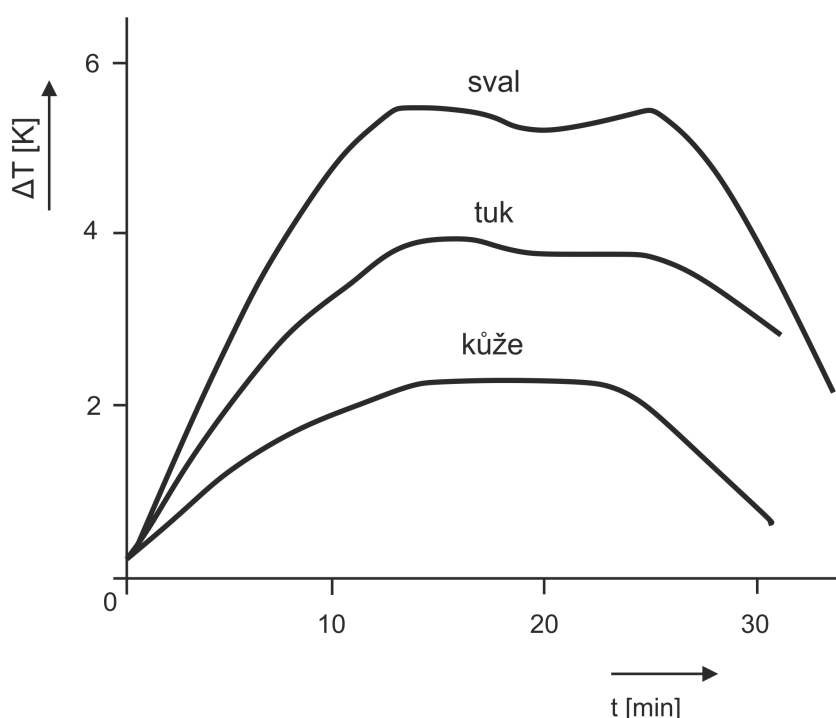
V literatuře a dokumentech zabývajících se ochranou zdraví před zářením se používá termín neionizující záření. Toto záření je definováno od 0 Hz po  $1,7 \cdot 10^{15}$  Hz a do něj také spadá statické i nízkofrekvenční elektrické a magnetické pole. Ionizující záření je potom definováno od  $1,7 \cdot 10^{15}$  Hz výše. Přestože mají různá elektromagnetická záření, stejný fyzikální původ, různé frekvence, působí jinak na organickou tkáň. Vliv elektromagnetického záření je spektrálně závislý. Účinky elektromagnetického záření na lidský organismus jsou v mnoha zemích po celém světě předmětem výzkumů už přes 20 let. V posledních letech vzrůstá zájem o tuto problematiku díky rozvoji bezdrátových sítí, ať se jedná o domácí síť jako WiFi (Wireless Fidelity) nebo o globální jako LTE (Long Term Evolution). Všechny tyto technologie mají tendenci vysílat co největší možný výkon z důvodu pokrytí nebo dosažení potřebné přenosové rychlosti. A v neposlední řadě se také zvyšuje počet vysílačů (Access point, BTS (Base Transceiver Station) ...). Značná část veřejnosti začíná projevovat obavy z nežádoucích, nebo dokonce škodlivých účinků elektromagnetického záření. Jedná se ovšem o velmi komplikovanou problematiku z toho důvodu, že působení neionizujícího elektromagnetického záření na živou tkáň závisí na chemicko-fyzikálních vlastnostech ozářené tkáně. Pod chemicko-fyzikálními vlastnostmi je možné si představit rozměry, hmotnost, charakter vrstev (kůže, svalstvo, tuk), charakter povrchu (oděv), obsah vody nebo fyzickou a psychickou kondici. Studie této problematiky také komplikuje fakt, že experimenty se musí provádět na zvířatech, a proto se ne vždy dají

zjištěné účinky přímo přenést na lidský organismus. Biologické účinky elektromagnetického záření se mohou rozdělit na dvě kategorie:

- tepelné účinky,
- netepelné účinky.

[16], [17], [18]

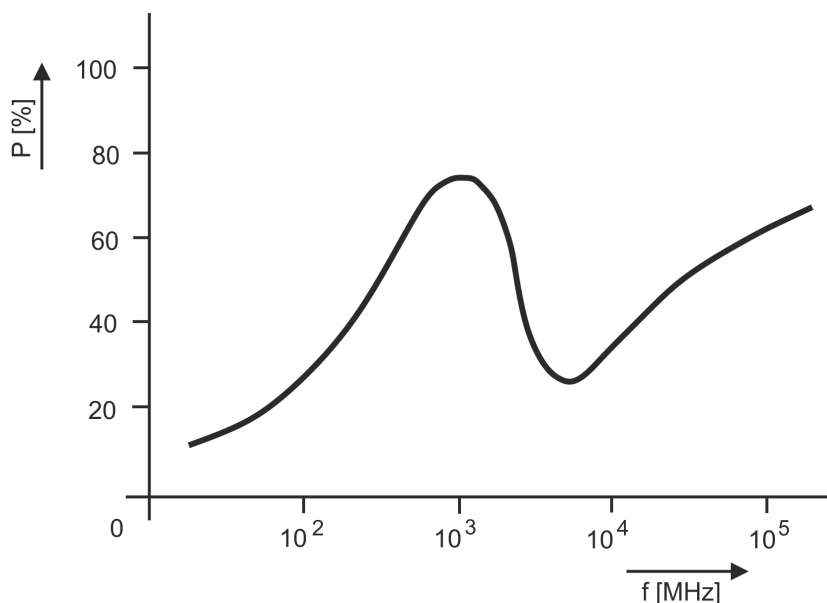
#### 2.4.1 Tepelné účinky



Obrázek 2.5: Oteplení vybraných tkání v závislosti na době expozice [17]

Tepelné účinky elektromagnetického záření se projevují objektivně indikovatelným zvýšením teploty tkáně, která je ozařována. Účinky jsou závislé na množství pohlcené energie a na hloubce, ve které se záření absorbuje. Elektromagnetické vlny, které mají milimetrové vlnové délky, se pohlcují na povrchu lidského těla, tedy na kůži. Vlny mající decimetrové vlnové délky pronikají hlouběji do lidského těla. Takže čím vyšší je frekvence elektromagnetického záření (menší vlnová délka), tím je menší hloubka vniku záření do tkání organismu. Výsledné účinky jsou závislé na rozměrech a tvaru biologických struktur, také na možnostech jejich ochlazování protékající krví nebo na odvodu tepla z povrchu organismu. Nejvíce se ohřívají hluboko uložené tkáně v břišní dutině jako například žaludek a střevo. A také méně prokrvené orgány jako

játra a ledviny. Průběh změny teploty vybraných tkání při působení elektromagnetického záření, dokumentující i adaptační schopnosti, můžeme vidět na obrázku 2.5. Při celotělových modelových studiích byla zjištěna závislost absorbovaného výkonu na frekvenci. Zjištěnou závislost lze vidět na obr. 2.6. [16], [17], [18], [19]



Obrázek 2.6: Frekvenční závislost absorbovaného výkonu [16]

### 2.4.2 Netepelné účinky

Netepelné účinky vlivem elektromagnetického záření se vysvětlují pomocí elektromagnetické indukce, díky které vznikají v ozařovaných tkáních iontové proudy a vlivem nichž se mění biologické vlastnosti buněčných membrán, například permeabilita a dráždivost. Významnost indukčních jevů pro vodivé části stoupá při ozáření impulsním polem. Tento účinek se pak promítá do centrálního a autonomního nervového systému, kardiovaskulárního systému i do vyměšujícího aparátu zažívacího traktu. Dlouhodobé působení elektromagnetického záření o malých výkonových hustotách se projeví na stavu centrální nervové soustavy. Tyto změny mají povahu tělesné slabosti jako vyčerpanost, únava, pokles koncentrace, poruchy spánku, bolesti hlavy a další. U některých jedinců se může vyskytnout zvýšená potivost, lámaní nehtů a padání vlasů. [16], [17], [18]

I přesto, že tato práce se zabývá anténou, která je navržena a pracuje na 21 MHz, tak budou v následujících podkapitolách popsána zdravotní rizika člověka vyskytujícího se v elektromagnetickém poli. A to v jednotlivých frekvenčních intervalech. Tak bude získán



přehled o tom, jak účinky elektromagnetického pole závisí na frekvenci. Budou zde také popsány i pozitivní účinky elektromagnetického pole na lidský organismus.

#### **2.4.3 Biologické účinky elektromagnetického záření na frekvenci nižší než 100 kHz**

Velikost vlnové délky je větší než 3 km. Při takto nízkých frekvencích se již jen hodnotí působení elektrického indukovaného proudu na nervovou soustavu. Ten se při nízkých frekvencích projeví více nepříznivě při nižším proudu než při ohřívání tkáně. Nejvyšší přípustné hodnoty byly stanoveny normou pro zaměstnance tak, aby byly bezpečně pod prahem možného zdravotního rizika. Pro ostatní exponované osoby jsou tyto limity ještě pětikrát nižší. Pro působení indukovaných elektrických proudů na nervovou soustavu je podstatné, že pro frekvence vyšší než 1 Hz účinnost těchto proudů se zvyšující frekvencí strmě klesá. U nízkofrekvenčních elektromagnetických polí se hodnotí okamžitá expozice, protože proud působí na nervovou soustavu okamžitě, téměř bez zpoždění. [14]

#### **2.4.4 Biologické účinky elektromagnetického záření v intervalu od 100 kHz do 10 MHz**

V tomto intervalu se velikost vlnové délky pohybuje od 3 km do 30 m. Na těchto frekvencích se projevují jak tepelné, tak i netepelné účinky elektromagnetického pole. Ani jeden z účinků (SAR a hustota indukovaných proudů) nesmí překročit stanovenou mez normou. [14]

#### **2.4.5 Biologické účinky elektromagnetického záření v intervalu od 10 MHz do 10 GHz**

Vlnová délka v tomto intervalu se pohybuje od 30 m do 30 mm. Elektromagnetické pole z této oblasti patří z hlediska nepříznivých účinků na lidský organismus k nejvíce sledovaným. Zajisté k tomu přispěly obavy z prudce vzrůstajícího počtu zdrojů mobilních sítí. Přestože v této problematice bylo vedeno v uplynulých letech mnoho výzkumů, nepodařilo se jednoznačně prokázat jiný nepříznivý vliv na lidský organismus, než ohřívání tkáně. Pokusy se prokázalo, že tělesná teplota při stálém dopadání dostatečně silného elektromagnetického pole na tělo se zvyšuje, přibližně po šesti minutách expozice teplota přestane stoupat a ustálí se na teplotě vyšší než u neozařovaného těla. Ohřívání tkáně nebo jiné části těla je úměrné části dopadajícího zářivého toku, který je absorbován a změněn na teplo. Nejvyšší přípustná hodnota SAR pro zaměstnance byla stanovena normou tak, aby při celotělové expozici při mírné činnosti exponované osoby se nezvýšila o více než o desetinu stupně. Jelikož je velmi obtížné zjistit vzrůst teploty o desetinu stupně i při přísně definovaných podmínkách, prováděly se příslušné pokusy a měření s vyšší intenzitou elektromagnetického pole tak, aby teplota vzrostla o stupeň a poté bylo nutné výsledek dopočítat. [14]

#### **2.4.6 Biologické účinky elektromagnetického záření v intervalu od 10 GHz do 300 GHz**

Délka vlny na tomto intervalu je od 30 mm do 1 mm. Záření s délkou vlny okolo 1 mm působí na člověka ohříváním povrchu jeho těla, které při dostatečně velké intenzitě je schopné vyvolat pocit tepla na kůži. Záření se účinně absorbuje v povrchové vrstvě kůže nebo oka, hlouběji neproniká. Záření, které má frekvenci z toho intervalu, se používá například v mikrovlnném datovém spoji nebo v radarech. Je obecně známo, že osoba, kterou zasáhne radarový paprsek do hlavy, uslyší v uchu krátké ostré lupnutí, pokud je dostatečně blízko vysílací antény radarového paprsku. Tento sluchový vjem vznikne v důsledku velmi rychlého nepatrného ohřátí hlavy, které vyvolá zvukovou vlnu. Tento jev se nepokládá za škodlivý, pokud není překročena mnohonásobně určitá mez. Nejvyšší přípustné hodnoty jsou v tomto intervalu stanoveny tak, aby při nich nedocházelo k výše zmíněnému jevu. Nejvyšší dovolená hodnota pro dlouhodobou expozici je stanovena nízko z důvodu rizika poškození povrchových vrstev oka, které má špatný odvod tepla. [14]

#### **2.4.7 Pozitivní účinky elektromagnetického záření**

Mluví-li se o pozitivních účincích elektromagnetického pole, myslí se především magnetické pole o malé intenzitě jednotky, maximálně desítky mT o nízké frekvenci od 1 Hz až po jednotky megahertz. U pozitivních účinků není rozhodující intenzita pole, kterou je osoba ozařována, ale frekvence, kterou dané pole kmitá, případně tvar pulzů. Proces, při kterém se používá magnetické pole k léčebným účinkům, se jmenuje magnetoterapie. Ta je zařazena na pomezí alternativní medicíny a to především díky tomu, že vědecky nelze vysvětlit a dokázat její princip. Mezi pozitivní účinky nízkofrekvenčního magnetického pole lze zařadit urychlení regenerace buněk, detoxikaci organismu, regeneraci svalové tkáně, stabilizaci krevního tlaku, posílení a stabilizaci kostní tkáně, zmírnění bolesti, rozšíření cév a zlepšení prokrvení exponované oblasti, protizánětlivý, antirevmatický a protiotokový účinek, posílení kostí i vazovité a chrupavčité tkáně a mnoho dalších. [20], [21]

### 3 Způsoby měření blízkého pole antény

V následující kapitole budou popsány základní senzory, které se využívají pro měření magnetického pole. Toto pole je jedním ze dvou v blízkém poli antény. Některé přístroje pro měření blízkého pole využívají právě jen senzory pro magnetické pole a hodnotu intenzity elektrického pole dopočítají.

#### 3.1 Senzory využívající Hallův jev

Pokud je vložena polovodičová destička, která má tloušťku  $d$  a protéká jí řídicí elektrický proud  $I$ , do magnetického pole s kolmým vektorem magnetické indukce  $B$  na směr řídicího proudu  $I$ , pak vznikne ve třetím směru napětí obr. 3.1. Toto napětí nazýváme Hallovo napětí a značí se  $U_H$ . Vznik Hallova napětí je způsoben magnetickou silou  $F_M$ , která působí na volné nosiče náboje tvořící řídicí proud  $I$  ve vložené polovodičové destičce. Síla  $F_M$  vyvolá, že se náboje vychýlí z původního směru. To způsobí narušení homogenity koncentrace nábojů a díky tomu vznikne elektrické pole  $E$ . Silový účinek vzniklého elektrického pole  $E$  je opačný než u magnetického pole. Během velmi krátké doby se ustálí rovnováha mezi elektrickou a magnetickou silou. Velikost vzniklého Hallova napětí lze vypočítat dle: [22]

$$U_H = R_H \frac{BI}{d} [V], \quad (3.1)$$

kde  $B$  je magnetická indukce,  $I$  je řídicí elektrický proud,  $d$  je tloušťka vložené polovodičové destičky a  $R_H$  je Hallova konstanta. Hallovu konstantu lze vypočítat dle: [22]

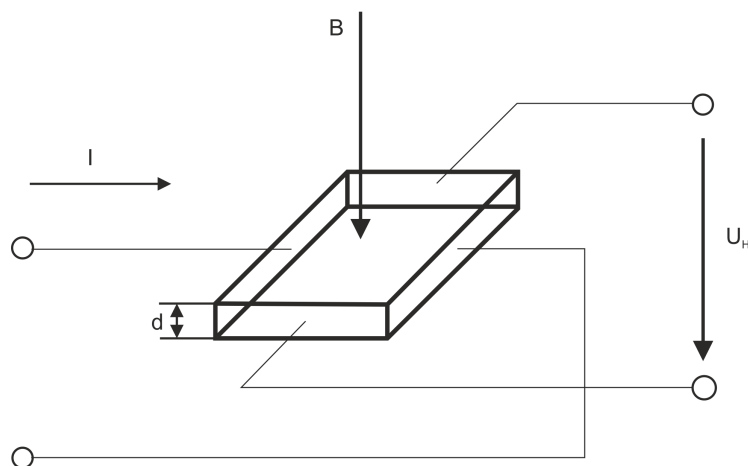
$$R_H = \frac{1}{qn} [m^3 A^{-1} s^{-1}], \quad (3.2)$$

kde  $q$  je náboj jednoho nositele náboje,  $n$  je koncentrace nositelů náboje v jednotce objemu. Konstanta je závislá na použitém materiálu destičky a může nabývat jak kladných, tak i záporných hodnot. [22], [23]

Senzory, které využívají Hallův jev, se nazývají Hallové sondy. Rozměry těchto sond mohou být malé. Protože neobsahují žádné feromagnetické materiály, neovlivňují Hallové sondy měřené magnetické pole. S Hallovou sondou lze měřit desetiny mT až po několik jednotek T. Velkou nevýhodou těchto sond je teplotní závislost. [24]

#### 3.2 Senzory využívající anisotropickou magnetickou resistanci

U těchto senzorů se využívá Anisotropická Magnetická Resistance, z čehož plyne název AMR a hovoříme o ní jako o AMR jevu. Tento jev funguje na principu změny elektrického

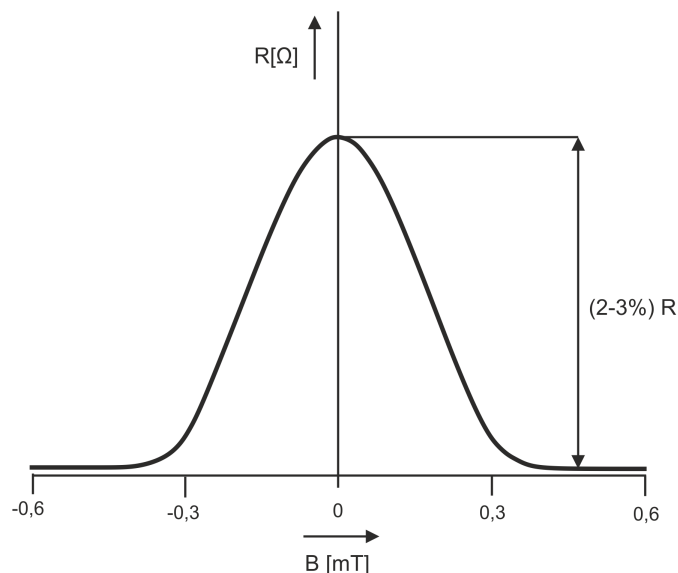


Obrázek 3.1: Princip snímače s Hallovým jevem [24]

odporu vlivem magnetického pole. AMR senzor se skládá z tenké vrstvy slitiny železa a niklu. Takto vzniklá slitina, nepůsobí-li magnetické pole, má svůj klidový odpor. Vlivem působení magnetického pole klidový odpor klesá téměř lineárně, ale jen v rozsahu okolo 2–3% z původní hodnoty odporu. Dále se odpor ani s rostoucí, ani klesající intenzitou magnetického pole nemění. Na obr. 3.2 lze vidět závislost změny odporu na intenzitě magnetického pole. Snímací rozsah ovlivňuje rozměr a tvar senzoru. Výsledný odpor je ovlivněn kromě intenzity magnetického pole také orientací senzoru vůči orientaci magnetického pole. Nepůsobí-li magnetické pole na senzor, jsou magnetické domény směrem k delší straně senzoru. V silném magnetickém poli tyto domény změni orientaci. Je-li směr magnetických domén rovnoběžný se směrem procházejícího proudu, je odpor největší, je-li směr kolmý, odpor je nejmenší. Směrovost lze potlačit použitím tříosého AMR senzoru. [25]

### 3.3 Senzory využívající Giant magnetickou resistanci

Tyto senzory se vyznačují GMR (Giant Magneto Resistive effect) jevem. GMR mají také závislost odporu na velikosti magnetického pole, které na senzor působí. Změna odporu je 10 až 50% z hodnoty odporu při klidovém stavu. GMR senzor se skládá z tenkých vstev feromagnetické slitiny, které mají rozměry v jednotkách nanometru. Mezi tyto vrstvy je vložena ještě menší vrstva, jež je jak magneticky, tak i elektricky vodivá. Střední vrstva bývá zpravidla měděná. Přestože je měď dobrý vodič, tak při takto malých rozměrech dochází k rychlému nárůstu elektrického odporu. Závislost odporu celého senzoru je převážně ovlivněna spinem procházejících elektronů. Spin je vlastnost elektronu, která udává, jak se elektron otáčí. Otáčí-

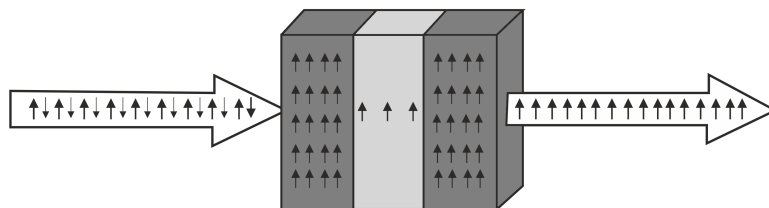


Obrázek 3.2: Závislost změny odporu na intenzitě magnetického pole [25]

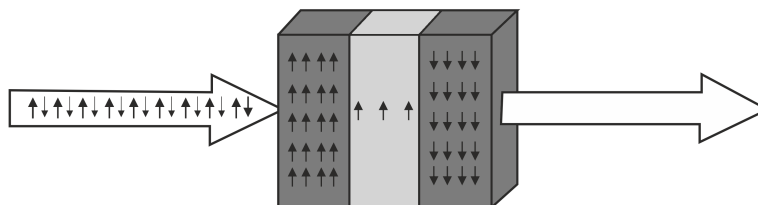
li se elektron ve směru hodinových ručiček, směřuje spin nahoru, otáčí-li se opačně, spin směřuje dolů. U elektricky vodivých nemagnetických materiálů se pohybuje stejný počet elektronů se spinem nahoru a dolů. U feromagnetických materiálů se volně pohybují pouze elektrony, kde spin souhlasí s magnetickým momentem materiálu. Na obr. 3.3 lze vidět, že vodičem, ve kterém je shodný počet elektronů se spinem nahoru a dolů, je přiveden elektrický proud na feromagnetickou vrstvu. Touto vrstvou projdou elektrony, jejichž spin se shoduje s magnetizací feromagnetické vrstvy. Prošlé elektrony se dostanou přes střední vrstvu až k druhé feromagnetické vrstvě. Má-li tato vrstva stejný směr magnetizace jako první vrstva, tak elektrony projdou a celková hodnota odporu senzoru je malá. Na obrázku 3.4 je zobrazen případ, kdy druhá feromagnetická vrstva je orientovaná opačným směrem než vrstva první. V tomto případě neprojde přes druhou vrstvu žádný elektron, protože přes první vrstvu se dostanou elektrony, které mají opačný spin. V tomto případě vykazuje senzor vysoký odpor. [26]

### 3.4 Senzory využívající tunelovou magnetickou resistanci

Dalším senzorem využívajícím magnetorezistivního jevu je TMR (Tunnel Magnetoresistance). TMR vykazují nejvyšší změnu odporu, a to 30 až 70% oproti klidovému stavu. Takto velká změna odporu je velice velká výhoda oproti GMR a AMR sensorům. TMR senzory však také přináší i značné nevýhody, jako například omezenou linearitu změny odporu vlivem magnetického pole, větší teplotní závislost a také nelineární voltampérovou charakteristiku. TMR senzory se skládají



Obrázek 3.3: Souhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru [26]



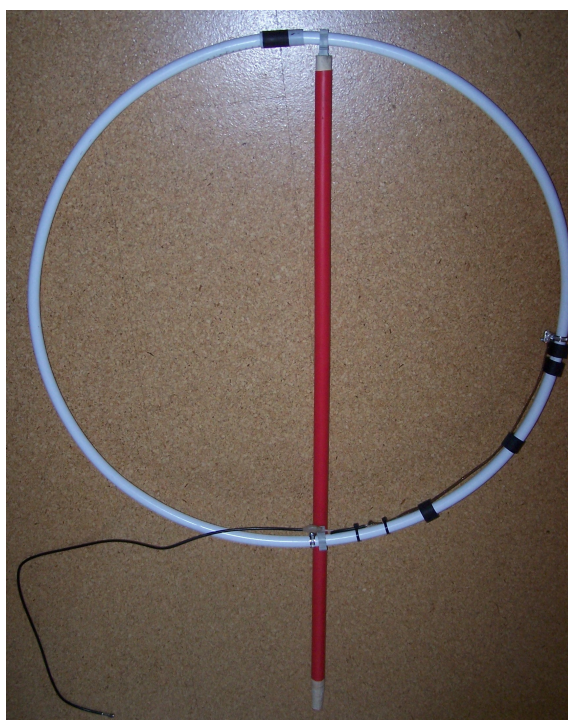
Obrázek 3.4: Nesouhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru [26]

ze dvou feromagnetických vrstev, mezi nimiž je umístěna vrstva nevodivá, např. vrstva oxidu hliníku. Vzniká zde předpoklad, že takto tvořenou strukturou nebude procházet proud, protože je střední vrstva nevodivá - izolant. Nevodivá vrstva je velice malá (jednotky nanometrů) a elektrony mají dostatečnou energii pro překonání (protunelování) této vrstvy. Tento jev popisuje kvantová fyzika, která jednotlivé možnosti pohybu elektronů popisuje energetickým modelem s Fermiho hladinou. Ta odděluje valenční vrstvu od vodivostní a určuje, kolik energie je potřebné dodat elektronu pro přechod z valenční do vodivostní vrstvy. U vodičů se tyto dvě vrstvy téměř dotýkají, energie potřebná pro přechod je tedy velice malá. U izolantů je mezi těmito dvěma vrstvami ještě zakázaná oblast, a proto je potřeba dodat mnohonásobně větší energii k přechodu elektronů do vodivostní vrstvy a to jen v případě, že vrstva izolantu je slabá a je za touto vrstvou další vrstva, která má dostatečné množství volných energetických hladin, kde se elektrony mohou umístit. Takto se elektrony mohou protunelovat přes vrstvu izolantu i s malou dodanou energií. Důležitou podmínkou jsou volné energetické hladiny za vrstvou izolantu. U TMR také závisí na spinu elektronů. Pokud jsou vrstvy okolo izolační vrstvy zmagnetovány stejně, tak elektrony, které mají stejný spin s magnetickým momentem feromagnetických vrstev,

se mohou protunelovat přes vrstvu izolantu. Strukturou tedy bude protékat proud a odpor senzoru bude malý. Bude-li jedna vrstva zmagnetizována opačně než druhá, bude porušena zásadní podmínka, nebude ve vrstvě za izolantem dostatečný počet energetických hladin. Elektrony se neprotunelují, senzorem neprotéká proud a odpor je tedy velký. [27]

## 4 Analýza smyčkové antény

Pro experimentální část této práce byla vybrána MLA anténa, která je buzena pomocí gama pahýlu. Anténa je navržena na radioamatérské pásmo 21–21,345 MHz. Toto pásmo je dále rozděleno podle typu provozu (nemodulovaná telegrafie, amplitudově modulovaný hlasový provoz nebo televizní obraz, digitální modulace). Na obrázku 4.1 je možno si prohlédnout použitou MLA anténu.



Obrázek 4.1: MLA anténa 21 MHz (plná velikost v příloze B.1)

Hlavní smyčka antény je vyrobena z pětivrstvé plasto-hliníkové trubky určené pro rozvody vody a topení o průměru 20 mm. Ladící kondenzátor je v tomto případě vyřešený vložením totožné trubky o menším průměru 16 mm, která spojuje oba konce. Aby bylo docíleno potřebné kapacity, je na menší trubce navlečen plastový kroužek, aby se oba konce nemohly dotknout a byla mezi nimi stejná vzdálenost. Poslední součástí ladícího kondenzátoru je opět plasto-hliníková topenářská trubka, ovšem o větším průměru (26 mm) než je průměr trubky tvořící hlavní smyčku. Při změně polohy této krátké trubky bude změněna kapacita a docílí se tak ladění antény. Podrobnější fotku takto jednoduchého ladícího kondenzátoru lze vidět na obrázku 4.2. Budicí obvod, tedy gama pahýl, je tvořen z měděného pásu obr. 4.3 o šířce 10 mm a je připevněn na obou koncích pomocí hadicové spony, která je z nerez oceli. V místě připevnění je samozřejmě část vrchního plastu z trubky tvořící hlavní smyčku odškrabána. K budicímu



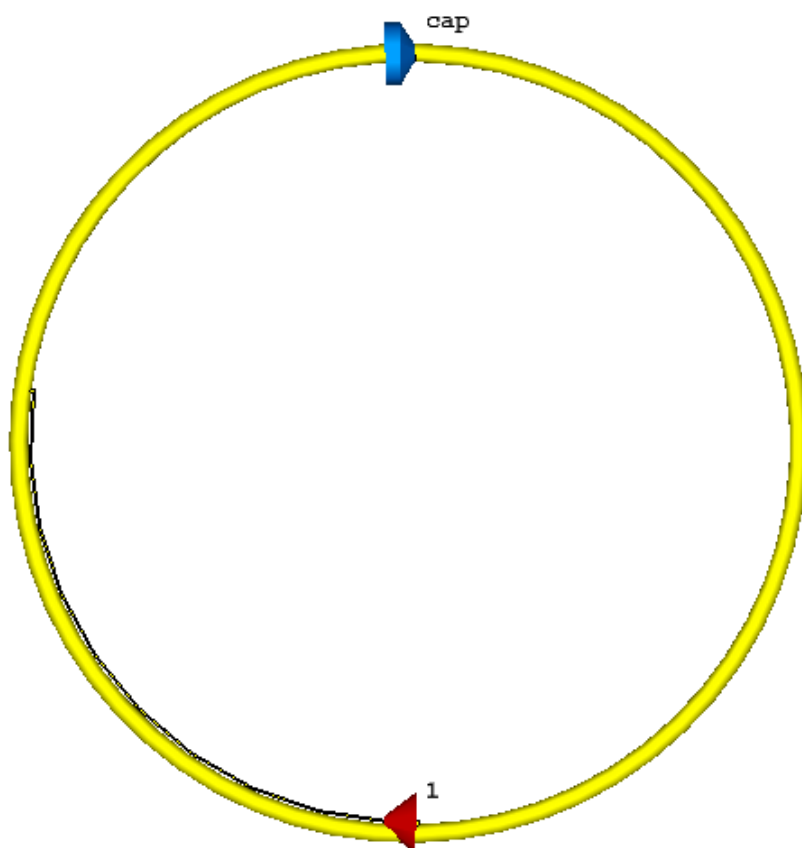


Obrázek 4.2: Laditelná kapacita antény (plná velikost v příloze B.2)



Obrázek 4.3: Gama pahýl antény (plná velikost v příloze B.3)

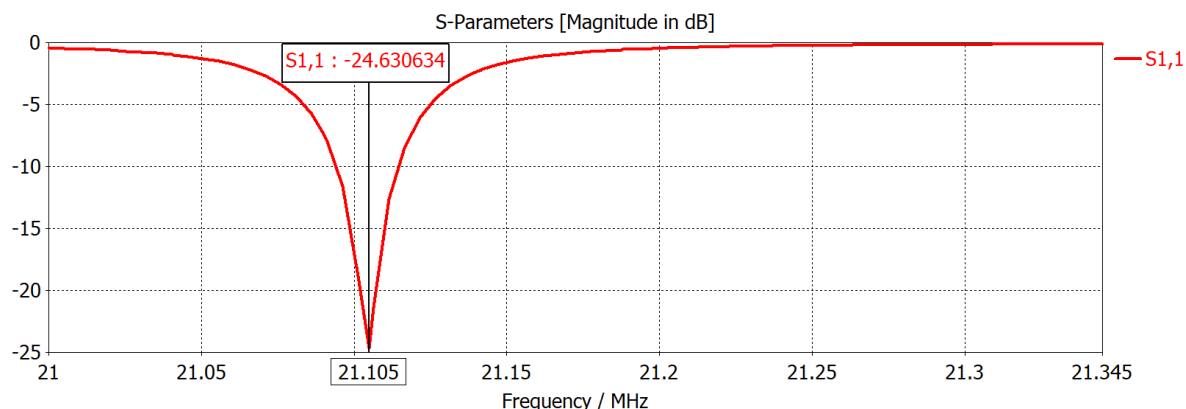
obvodu je připájen koaxiální kabel, který je zakončen SMA konektorem. Gama pahýl je dále připevněn několika nevodivými připevňovacími prvky, aby kopíroval zakřivení hlavní smyčky. Zároveň je s ním umožněno do určité míry pohybovat pro doladění antény. Podrobnější fotku gama pahýlu je možné vidět na obrázku 4.3. Držák antény je tvořen dřevěnou násadou, ke které jsou přišroubovány plastové úchyty na trubku, do kterých je zasazena trubka tvořící hlavní smyčku. Tuto násadu lze vsunout do železné trubky, která dovoluje upevnění do země.



Obrázek 4.4: Namodelovaná MLA anténa v programu CST (plná velikost v příloze C.1)

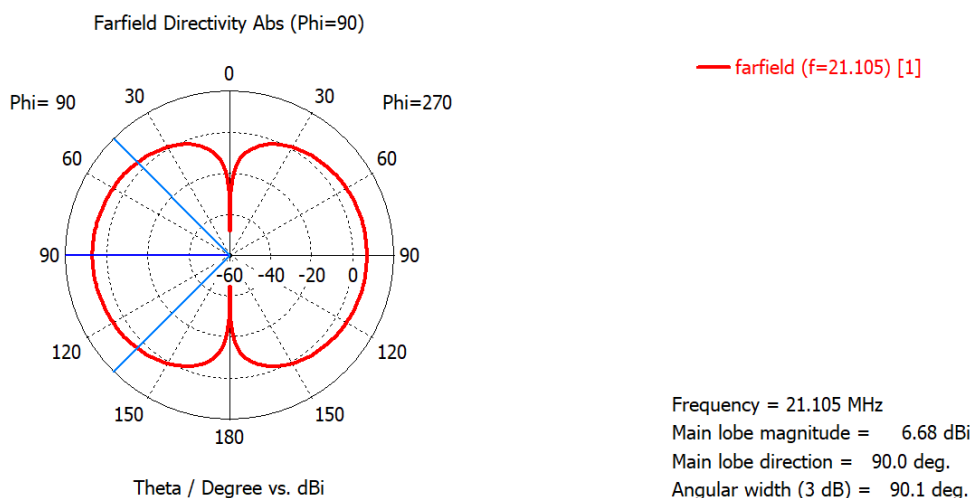
### 4.1 Simulace blízkého pole magnetické smyčkové antény v prostředí CST

Pro simulaci antény byl použit program CST Studio Suite (dále jen CST). Jelikož byla anténa již vyrobena a odzkoušena, bylo potřeba ji namodelovat a doladit v programu CST. Při modelování musela být anténa zjednodušena z důvodu zmenšení Mesh cell, což vede ke snížení potřebného výpočetního času a zanesená chyba zjednodušením je minimální. Na obrázku 4.4 lze vidět namodelovanou anténu v programu CST. Anténa byla poskládána z několika



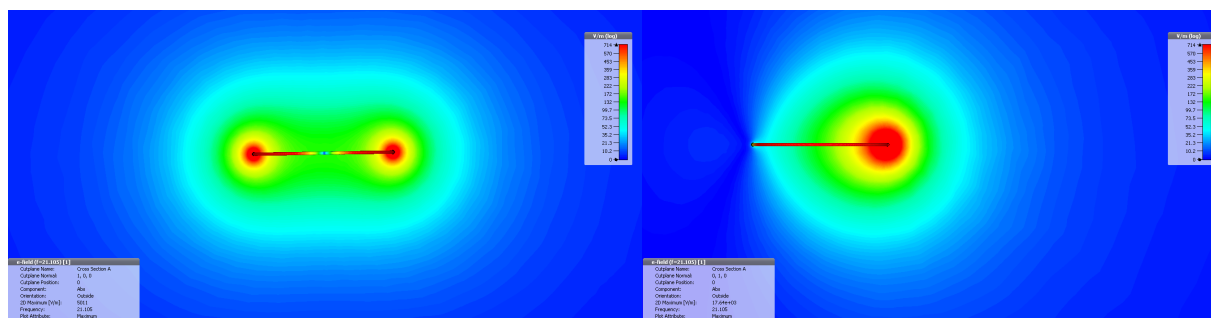
Obrázek 4.5: Simulace S11 MLA antény (plná velikost v příloze C.2)

částí, které byly potom spojeny v jeden logický celek. Hlavní smyčka je namodelována jako prstenec, který má stejný průměr jako průměr hliníkové stěny topenářské trubky. Gama pahýl je namodelován jako válec. Držáky, které zkratují gama pahýl s hlavní smyčkou, jsou vytvořeny pomocí obdélníků.



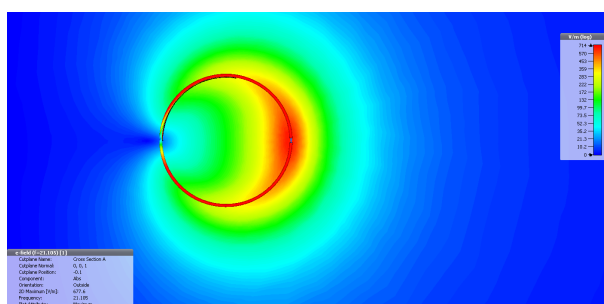
Obrázek 4.6: Směrová charakteristika - CST (plná velikost v příloze C.3)

Protože anténa byla již vyrobená, byl omezený počet možností, jak anténu v CST studiu naladit. Anténa byla laděna změnou vzdálenosti gama pahýlu od hlavní smyčky nebo změnou kapacity. Zpětný odraz S11 naladěné antény dosahuje nejlepší hodnoty -24 dB, jak je možné vidět na grafu 4.5. Maximální hodnotu odrazivosti dosahuje při frekvenci 21,105 MHz. Zisk antény na frekvenci 21,105 MHz se pohybuje okolo 6,68 dBi a směrovou charakteristiku je možné vidět na grafu 4.6. Na obrázcích 4.7 je znázorněno blízké pole MLA antény, konkrétně elektrickou



(a) Horizontální řez (plná velikost v příloze C.4)

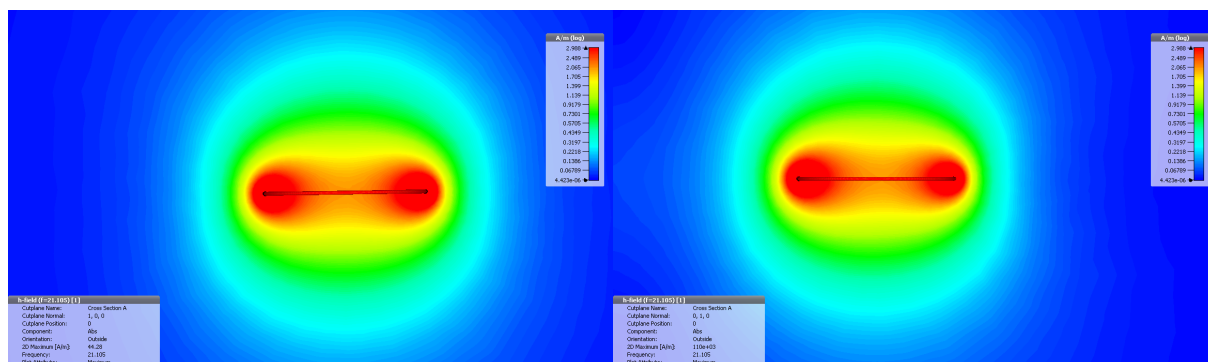
(b) Vertikální řez (plná velikost v příloze C.5)



(c) 100 mm před anténou (plná velikost v příloze C.6)

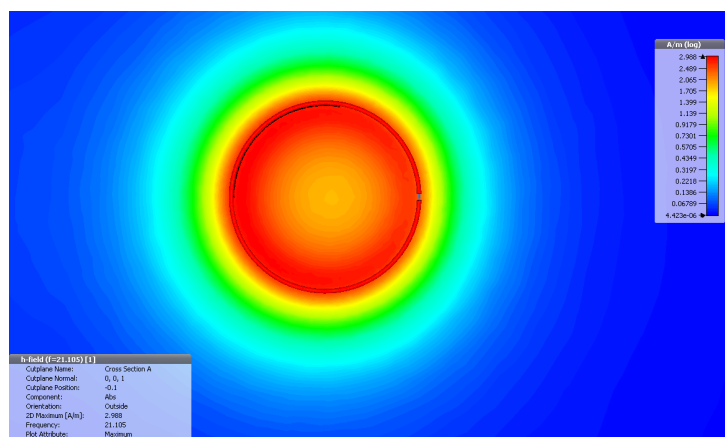
Obrázek 4.7: Složka E - 3D pohled

složku E, na 4.7a je zobrazena v horizontálním řezu, na 4.7b ve vertikálním řezu a na 4.7c je zobrazena složka 100 mm před anténou. Jak elektrická, tak i magnetická složka je vypočítaná pro výkon 1 W a pro kmitočet 21,105 MHz. Na obrázcích 4.8 je možné spatřit magnetické pole H, na 4.8a je anténa vyobrazena v horizontálním řezu, na 4.8b ve vertikálním řezu a na 4.8c je magnetická složka 100 mm před MLA anténou. Simulační program CST studio rovněž umožňuje výpočet SAR. K výpočtu potřebuje mít definovaný objekt se ztrátovým materiálem. Proto byla přidána do projektu koule o průměru 200 mm, která představuje zjednodušenou lidskou hlavu. Tato koule je z materiálu, který má stejné elektrické a magnetické vlastnosti jako lidská tkáň ( $\epsilon_r = 28,9$ ,  $\mu_r = 1$ ,  $\sigma = 0,07 \text{ S/m}$ ). Na obrázku 4.9 lze vidět vypočtený SAR ve všech třech osách. Vzdálenost středu koule představující hlavu je půl metru od antény. Vysílací výkon antény je nastaven na 100 W. I přes větší výkon lze pozorovat, že hodnoty SAR jsou dost nízké. V ose A je nejvyšší hodnota SAR = 0,198 W/kg, osa B je SAR = 0,0614 W/kg a v ose C je maximum SAR = 0,101 W/kg. Nízké hodnoty jsou zapříčiněné tím, že je zde vyobrazena zjednodušená hlava. Přesnějšího výpočtu SAR by se docílilo přesným modelem celého lidského těla. Program umožňuje vložit model lidského těla tzv. voxel data, ta však přináší mnohá úskalí, jako například velký nárůst potřebného výpočetního výkonu nebo výpočet jen okolo definovaných frekvencí (100, 450, 900, ..., 2400 MHz).



(a) Horizontální řez (plná velikost v příloze C.7)

(b) Vertikální řez (plná velikost v příloze C.8)



(c) 100 mm před anténou (plná velikost v příloze C.9)

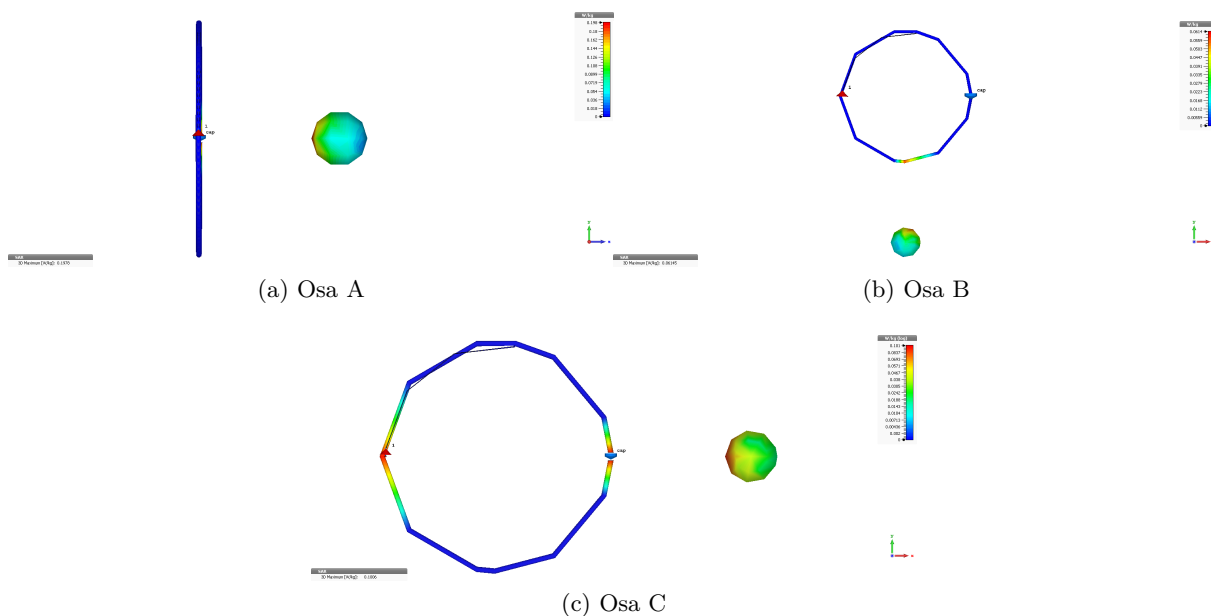
Obrázek 4.8: Složka H - 3D pohled

## 4.2 Měření blízkého pole antény

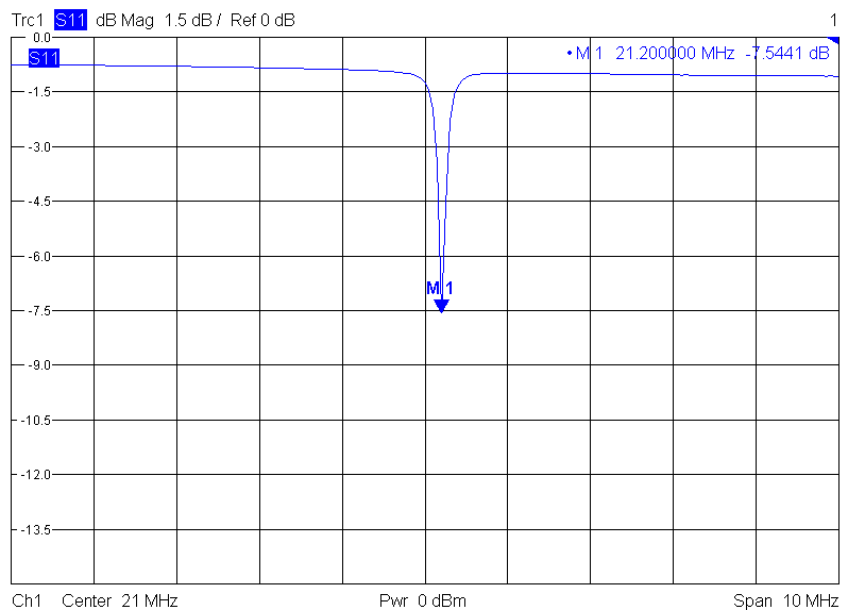
Prvotní měření antény pro zjištění rezonanční frekvence a možností ladění proběhlo v Laboratoři rádiových sítí EB209 VŠB-TU Ostrava. K měření průběhu zpětného odrazu  $S_{11}$  antény byl použit vektorový obvodový analyzátor ZVB4 od firmy Rohde&Schwarz, který má rozsah 300 kHz až 4 GHz. Změřený průběh je vyznačen na grafu 4.10, z kterého je možné vyčíst, že anténa rezonuje na 21,2 MHz, kde  $S_{11} = -7,54$  dB.

Další měření probíhalo v otevřeném prostoru na louce, proto byl pro další měření použit mobilní vektorový obvodový analyzátor DG8SAQ od firmy SDR-Kits s rozsahem od 1 kHz do 1,3 GHz (obr. 4.11). Tento analyzátor se připojuje k osobnímu počítači přes rozhraní USB, ze kterého je rovněž napájený. Analyzátor bylo nutné před měřením zkalibrovat pomocí kalibrační soupravy, která je součástí příslušenství analyzátoru. Analyzátor obsahuje funkci jednoduchého signálového generátoru s maximálním výstupním výkonem -17 dBm (20  $\mu$ W), jedná se o relativně malý výkon, jenž nedostačuje k potřebnému vybuzení MLA antény.





Obrázek 4.9: Výpočet SAR



Obrázek 4.10: Průběh S11 - měření

Z důvodu malého výstupního výkonu DG8SAQ musel být použit signálový generátor SMLH od firmy Rohde&Schwarz s frekvenčním rozsahem od 10 kHz do 40 MHz (obr. 4.12). Generátor obsahuje dva signálové výstupy, jeden nízkovýkonový a druhý vysokovýkonový. Na generátoru lze plynule nastavovat výstupní výkon od -140 dBm až po 33 dBm (2 W).



Obrázek 4.11: Vektorový obvodový analyzátor DG8SAQ



Obrázek 4.12: Signálový generátor SMLH

Jako poslední, ovšem neméně důležitý přístroj pro měření je širokopásmový měřič EMR-20 od firmy Narda. Tento přístroj měří elektrické pole  $E$  od 100 kHz do 3 GHz, magnetickou složku dopočítá. U měřiče je k dispozici izotropická sonda. Sonda je schopná měřit elektrické

pole od 0,01 V/m a magnetické pole je schopná dopočítat s přesností 0,1 mA/m. Tyto hraniční hodnoty pro měření jsou pro tuto práci dostačující. Na obrázku 4.13 lze vidět zmíněný přístroj EMR-20 s izotropní sondou.



Obrázek 4.13: Narda EMR-20

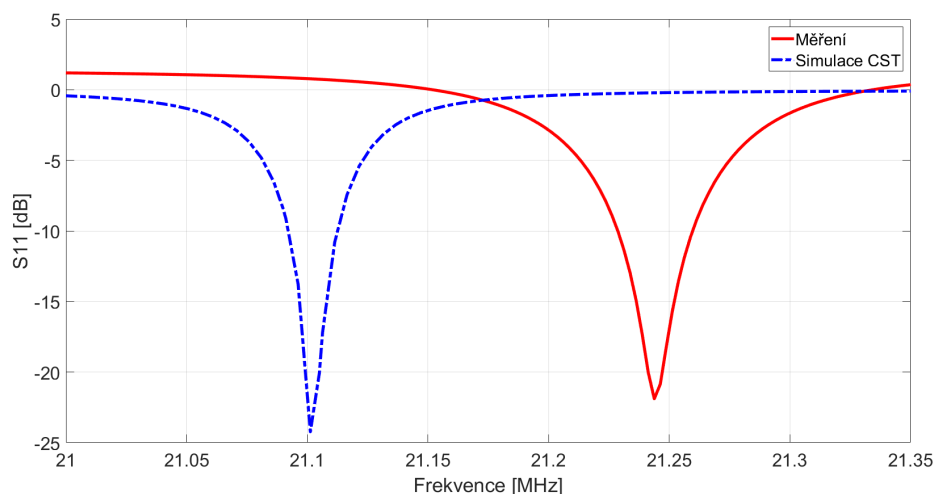
### 4.2.1 Postup měření elektrického a magnetického pole antény

Samotné měření blízkého pole antény probíhalo v otevřeném prostoru, aby bylo co nejméně ovlivněno různými překážkami a stěnami. Pro měření byla vybrána louka v Kozlovicích. Ve vzdálenosti okolo 70 m ( $5 \cdot \lambda$ ) od místa měření se nachází dům, ze kterého byla přivedena potřebná elektrická energie pro napájení signálového generátoru.

Nejdříve byla anténa připojena k vektorovému obvodovému analyzátoru, který byl předtím zkalibrován. Po připojení k analyzátoru byla anténa doladěna na co největší zpětný odraz S11 a zároveň co nejmenší PSV. Ladění antény probíhalo změnou kapacity a zároveň úpravami vzdálenosti gama pahýlu. Průběh zpětného odrazu po naladění v otevřeném prostředí před



měření blízkého pole lze vidět na obrázku 4.14. Anténa byla naladěna na 21,24 MHz a S11 při této frekvenci dosahuje -22 dB. Následně byla tato frekvence nastavena na signálovém generátoru a výstupní výkon byl nastaven na 1 W.

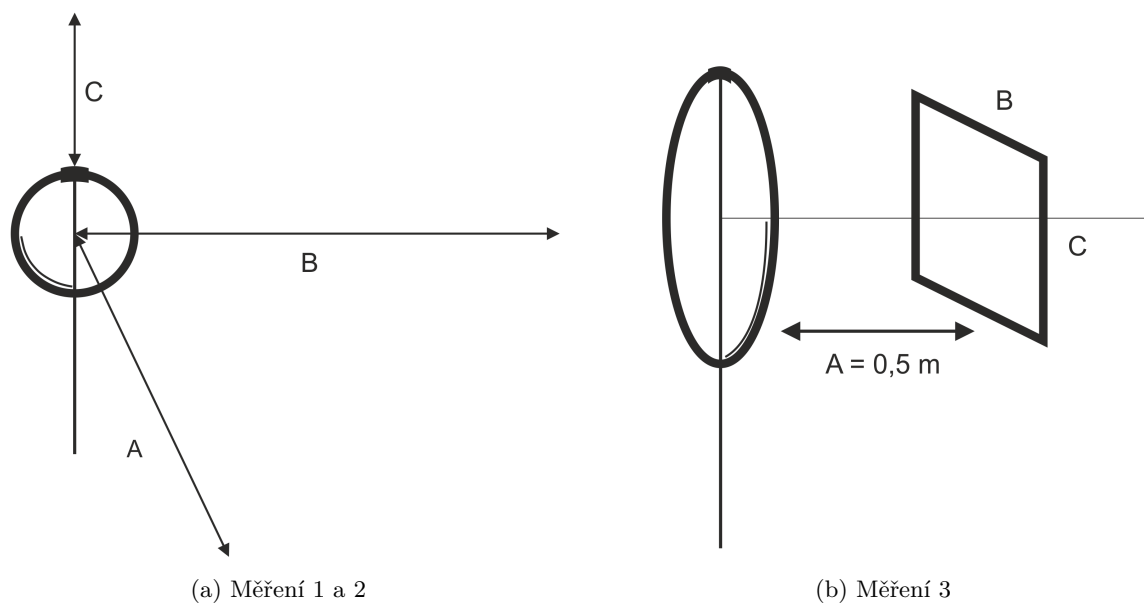


Obrázek 4.14: Průběh S11 - měření v otevřeném prostoru (plná velikost v příloze D.1)

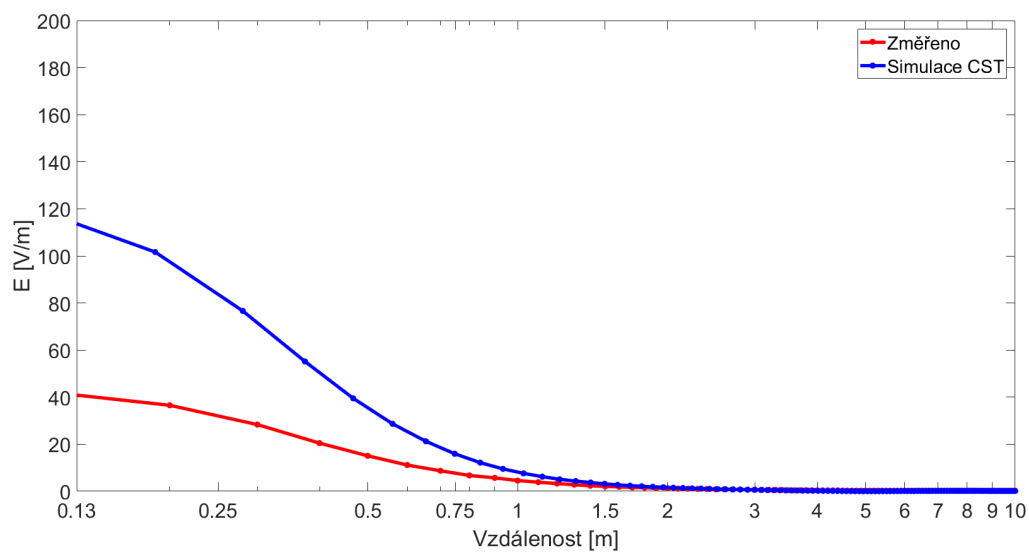
Jelikož nařízení vlády č. 291/2015 Sb. nedefinuje způsob ani konkrétní vzdálenost, jak pole měřit, byl zvolen následující postup. Měření bylo rozděleno na tři části. V první části se měřilo po přímce kolmo na anténu, na schématu 4.15a je to přímka, která je označena jako A. Měření začínalo 130 mm od antény a končilo ve vzdálenosti 10 m s krokem 100 mm. Aby byla dodržena stejná vzdálenost od země a také aby byla stejná vzdálenost mezi jednotlivými měřeními (100 mm), byl natažen provázek, který byl upevněn ve středu hlavní smyčky antény a na druhém konci přivázán ve stejné výšce jako začátek. Na provázku byly také vytvořeny značky s krokem 100 mm pro přesný rozestup mezi jednotlivými měřeními.

Ze sondy blízkého pole byly zapisovány hodnoty elektrického pole E ve V/m a magnetického pole H v A/m a zapisovány. Po změření celé vzdálenosti se konec přesunul o 90°, aby mohla být změřená osa B dle schématu 4.15a. Měření proběhlo stejně jako v předešlém kroku. V poslední části se zjišťovalo rozložení pole půl metru před anténou. Měřilo se ve čtverci, kde délka strany se rovnala průměru antény a střed čtverce byl ve stejné výšce jako střed MLA antény. Měření probíhalo s rastrem 100 mm. Pro přesné umístění měřící sondy byl rovněž natažený provázek.

Výsledek měření na ose A lze vidět na grafu 4.16, kde červený průběh představuje elektrické pole E, které bylo naměřené. Osa X v následujících 2D grafech je v logaritmickém měřítku. Na grafu 4.17 představuje červený průběh naměřené hodnoty magnetického pole H v závislosti na vzdálenosti od antény v ose A.

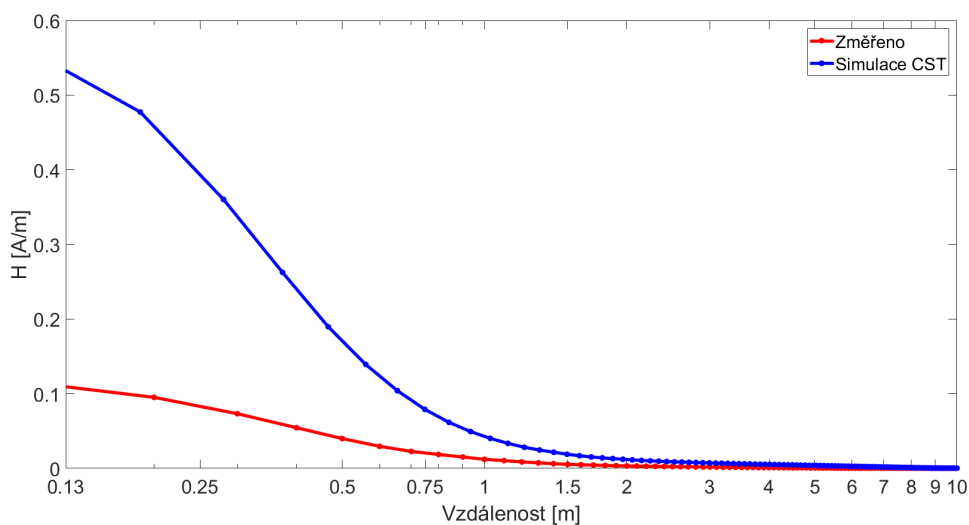


Obrázek 4.15: Plán měření

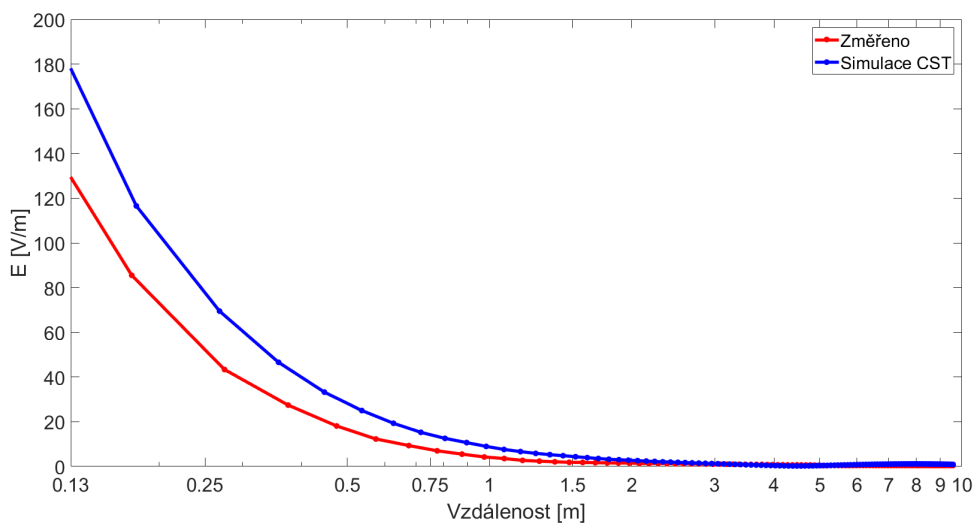


Obrázek 4.16: Závislost elektrického pole E na vzdálenosti od antény v ose A (plná velikost v příloze E.1)

Výsledek druhé části měření lze pozorovat na grafu 4.18, kde červený průběh představuje naměřené elektrické pole E. Z grafu, který lze vidět na obrázku 4.19, je patrná závislost magnetického pole na vzdálenosti od antény měřené v ose B. Červený průběh představuje naměřené hodnoty.

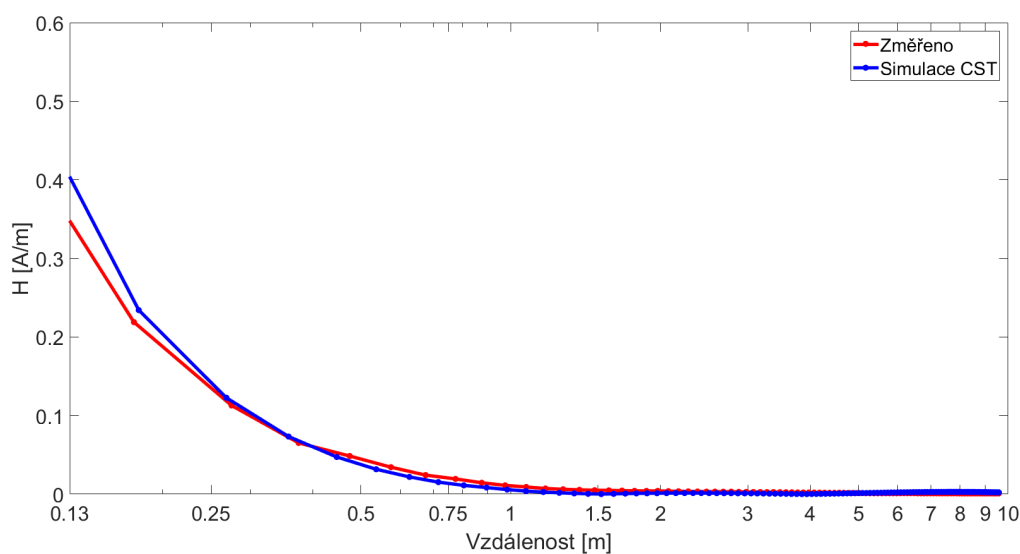


Obrázek 4.17: Závislost magnetického pole  $H$  na vzdálenosti od antény v ose A (plná velikost v příloze E.2)



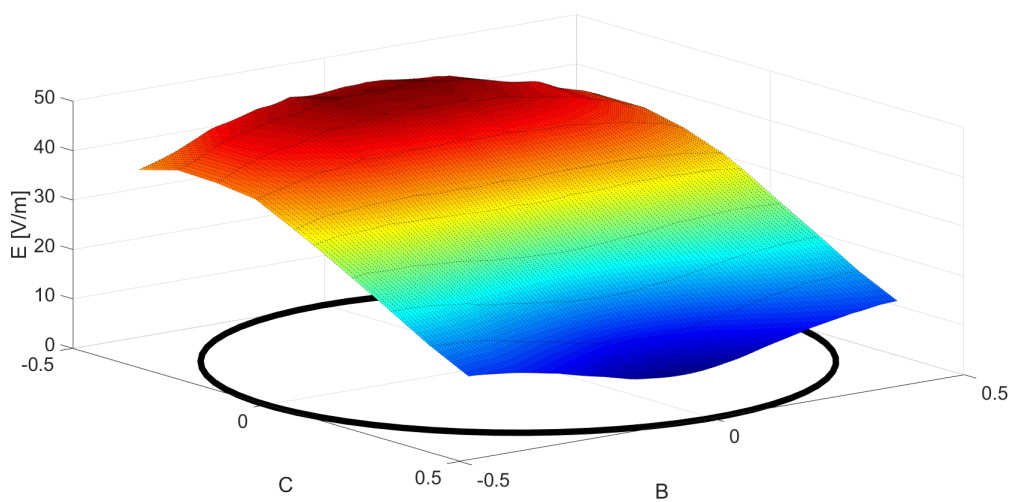
Obrázek 4.18: Závislost elektrického pole  $E$  na vzdálenosti od antény v ose B (plná velikost v příloze E.3)

Poslední část měření, tedy měření půl metru před anténou na ose A, ve čtverci, který má svůj střed ve stejné výšce jako střed antény, lze vidět na 3D grafu 4.21 elektrickou složku  $E$ . Na 3D grafu 4.23 je možné pozorovat závislost magnetického pole  $H$  na poloze půl metru před anténou. Chybám měření je dále věnována podkapitola 4.3.1. Fotografie z měření je možné si prohlédnout na příloze D.



Obrázek 4.19: Závislost magnetického pole H na vzdálenosti od antény v ose B (plná velikost v příloze E.4)

### 4.3 Validace blízkého pole magnetické smyčkové antény

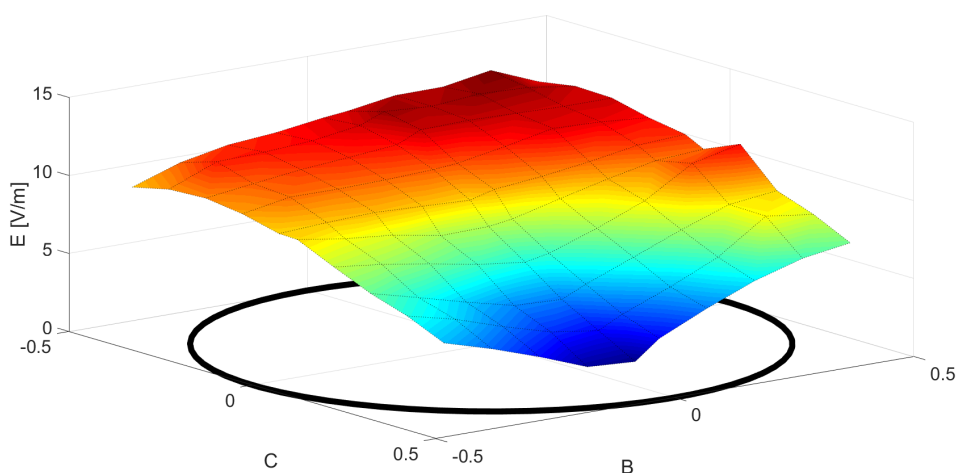


Obrázek 4.20: Elektrické pole před anténou simulace CST (plná velikost v příloze E.5)

Na grafu 4.16, kde červený průběh představuje naměřené hodnoty elektrického pole přístrojem Narda EMR-20, je možné sledovat hodnoty elektrického pole, které byly odsimulovány pomocí CST studia a vyexportovány do společného grafu s naměřenými výsledky - modrý

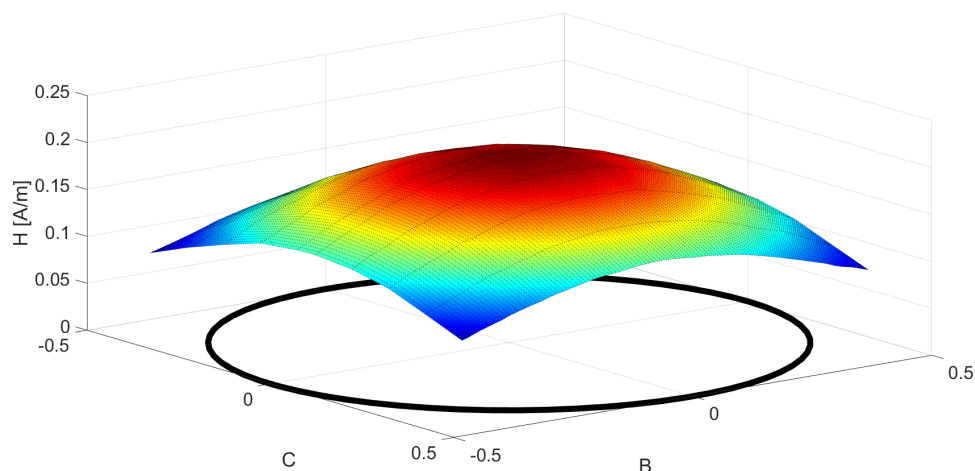
průběh. Vyexportované hodnoty tvoří závislost složky  $E$  na vzdálenosti od antény ve stejné výšce jako je střed antény. Výkon byl v obou případech nastaven na 1 W, takže podmínky byly vytvořeny shodně pro simulaci i pro následující měření. V ideálním případě by se tyto dvě závislosti měly rovnat. Při pohledu na graf je zřejmé, že se závislosti nerovnaj, v blízkosti antény se hodnoty liší. Odsimulované výsledky jsou zde až čtyřikrát větší než naměřené. Ve vzdálenosti okolo jednoho metru od začátku měření je možné pozorovat, že se obě závislosti téměř rovnají. Obdobná situace nastává u magnetické složky, kde naměřené hodnoty jsou cca pětikrát menší při začátku měření a ve vzdálenosti metr od začátku se závislosti začínají přibližovat.

Při porovnávání výsledků měření a odsimulovaných hodnot elektrického pole obr. 4.18 a magnetického pole obr. 4.19 v druhé části měření, tedy na ose kolmé, lze vidět, že v této ose není rozdíl mezi vypočítanými výsledky pomocí CST a naměřenými tak velký, jak tomu bylo v prvním kroku měření.

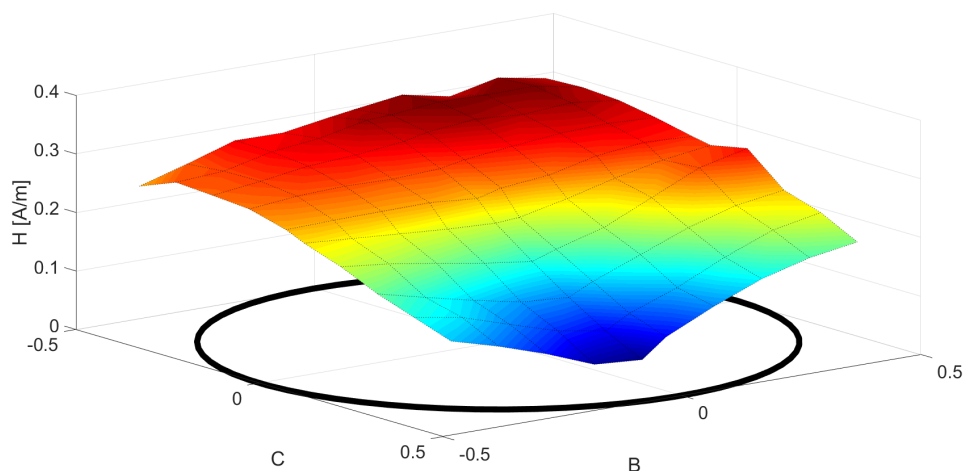


Obrázek 4.21: Elektrické pole před anténou změřeno (plná velikost v příloze E.6)

Při sledování výsledků poslední části měření je jasné, že naměřené hodnoty budou několikanásobně menší než vypočtené, vychází-li se ze závislosti elektrického pole obr. 4.16 a magnetického pole obr. 4.17. V tomto měření jde především o to zjistit, zda vypočtené elektromagnetické pole programem CST a naměřené pole má stejné rozložení. Z obrázků 4.20 a 4.21 je patrné, jak vypočtené tak odměřené elektrické pole. Zde černý kruh představuje hlavní smyčku antény. Na 3D grafu 4.20 lze spatřit vypočtenou složku  $E$ . Z tohoto grafu vyplývá, že největších hodnot je dosaženo v úrovni laditelné kapacity. Toto pole postupně klesá s výškou, nejmenších hodnot dosahuje u napojení na gama pahýl. Na obrázku 4.21 je patrná naměřená závislost elektrické složky. Naměřené hodnoty mají skoro stejný tvar jako vypočtené hodnoty s přihlédnutím na pětikrát menší hodnoty.



Obrázek 4.22: Magnetické pole před anténou simulace CST (plná velikost v příloze E.7)



Obrázek 4.23: Magnetické pole před anténou změřeno (plná velikost v příloze E.8)

Při pozorování obrázků 4.22 a 4.23 je možné sledovat obdobnou situaci jako v předchozím případě, ale zde se jedná o magnetickou složku  $H$ . Na 3D grafu 4.22 lze spatřit vypočtenou závislost elektrického pole na poloze ve vzdálenosti půl metru před anténou. Vypočtená závislost připomíná inverzní graf funkce  $f(x, y) = x^2 + y^2$  a má největší hodnotu magnetického pole uprostřed, odkud se pak hodnoty rovnoměrně zmenšují do všech stran. Zatímco u naměřené magnetické složky 4.23 tvar velice připomíná tvar elektrického pole. Tato velká nesrovnalost je pravděpodobně způsobena tím, že měřicí přístroj Narda EMR-20 měří pouze elektrickou složku a magnetickou složku dopočítává.

#### 4.3.1 Faktory ovlivňující změřené blízké pole

Jeden z faktorů, který ovlivnil změřené blízké pole magnetické smyčkové antény, byla přítomnost mého těla v měřeném poli z důvodu, že měřicí přístroj neumožňuje dálkové odečítání hodnot. Tuto chybu měření lze odstranit použitím měřicího přístroje s dálkovým odečtem hodnot.

Dalším faktorem je samotná chyba měřicího přístroje. Výrobce udává, že tento typ přístroje pracuje s absolutní chybou  $\pm 1$  dB a s izotropní odchylkou sondy elektrického pole  $\pm 0,5$  dB a teplotní závislostí přístroje  $+0,2/-1$  dB. V nejhorším případě se může výsledek lišit až o 2,5 dB.

Třetím faktorem, který ovlivnil měřené pole, bylo samotné prostředí, ve kterém se měřilo. Aby se co nejvíce přiblížilo měřené pole k vypočtenému poli, muselo by se měřit v dostatečně velké odstíněné bezodrazové komoře. Jelikož měření probíhalo na otevřeném prostranství - louce, nacházely se ve vzdálené oblasti antény překážky, jako stromy, keře a v neposlední řadě dům s plechovou střechou. Místo bylo vybráno tak, aby se vliv těchto překážek co nejvíce eliminoval. Přístroj, kterým se měřilo blízké pole, neumožňuje selektivní výběr měřeného frekvenčního rozsahu, proto měří na celém svém rozsahu. V místě měření je možné detekovat elektromagnetické pole i z jiných zdrojů záření, jako vysílače mobilních, televizních nebo rozhlasových signálů a další zdroje elektromagnetického záření. Protože intenzita elektrického pole, případně magnetická indukce v místě měření bez zapnutého zdroje měřené MLA antény, v porovnání s měřenými intenzitami byla tak malá (maximálně 0,03 V/m a 0,1 mA/m), lze tento faktor zanedbat.

Poslední faktor ovlivňující rozdíl změřeného pole a odsimulovaného je zjednodušení antény pro prostředí CST a také nevytvoření některých prvků, například držák antény. To může způsobit deformaci vyzařovací charakteristiky a blízkého pole antény. Tato deformace poté způsobuje, že naměřené hodnoty jsou až pětikrát menší než vypočtené v ose A, která je nejcitlivější na deformaci z důvodu tvaru vyzařovací charakteristiky.

## 5 Stanovení bezpečných vzdáleností od magnetické smyčkové antény

Protože nařízení vlády stanovuje referenční hodnoty pro intenzitu elektrického pole a intenzitu magnetického pole, je posouzení, zda dochází k překročení hygienických limitů zjednodušeno tím, že se nemusí výsledky intenzit přepočítávat na měrný absorbovaný výkon nebo na hustotu elektrického proudu, aby mohlo dojít k posouzení hygienických limitů. Tento dvojí způsob hodnocení expozice bez výpočtů nebo případně měření umožňuje rozhodnout o nepřekročení nejvyšších přípustných hodnot, také poskytuje možnost posuzovat i velmi složité expoziční situace, jako například používání mobilního telefonu u hlavy nebo posuzování expozice v silně nehomogenním magnetickém poli se složitým časovým průběhem.

V tabulce 5.1 jsou zobrazeny referenční hodnoty pro intenzitu elektrického pole a magnetickou indukci pro frekvenci 21 MHz, na které měřená a odsimulovaná anténa pracuje. Nařízení vlády stanovuje limity pro ostatní osoby a mírnější limity pro zaměstnance, obojí jsou uvedeny v tabulce. Z grafu 2.1 a 2.2 lze vypožorovat, že frekvence 21 MHz spadá do nejvíc nebezpečných frekvencí, které mají negativní vliv na exponovanou osobu, a proto jsou v tomto frekvenčním intervalu limity nejprísnejší. Protože použitý měřicí přístroj a CST studio udává výsledky magnetického pole jako intenzitu magnetického pole  $H$ , je zde uvedena referenční hodnota i pro intenzitu magnetického pole, která se přepočítala dle:

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 0,1592 \text{ A/m}, \quad (5.1)$$

kde  $\mu$  je permeabilita prostředí - vzduch.

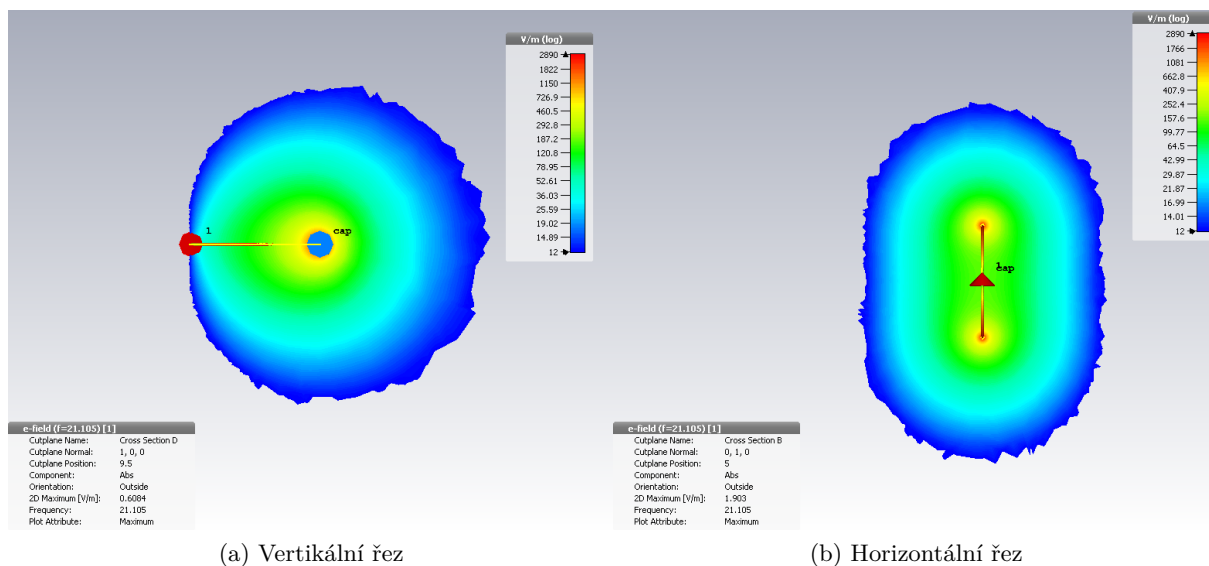
Tabulka 5.1: Referenční hodnoty pro frekvenci 21 MHz

	Referenční hodnoty	
Veličina	Pro zaměstnance	Pro ostatní osoby
E	61 V/m	12 V/m
B	$2 \cdot 10^{-7}$ T	$4 \cdot 10^{-8}$ T
H	0,1592 A/m	0,0318 A/m

Ze simulací, ale také z měření ve vzdálenosti půl metru před anténou v ose A vyplynulo, že největší intenzita elektrického pole se nachází ve stejné výšce jako je ladící kondenzátor antény a největší intenzita magnetického pole se nachází ve výšce středu antény - uprostřed. Aby bylo zjištěno, jak je elektrické a magnetické pole rozloženo, byla v simulačním programu CST nastavena taková vizualizace, že hodnoty větší než 12 V/m budou zobrazeny, nižší nikoliv. Stejně tak u magnetického pole byly zobrazeny pouze hodnoty větší než 0,0318 A/m. Jedná se o referenční hodnoty pro ostatní osoby z nařízení vlády. Tímto zobrazením bylo dosaženo toho,



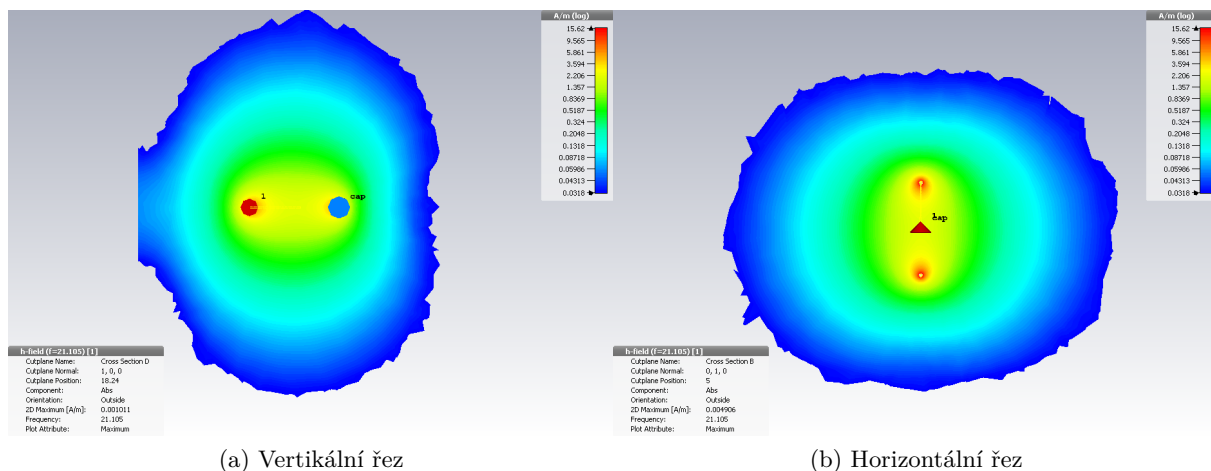
že v jednotlivých rovinách je možné sledovat tvar nadlimitního blízkého pole antény. Na obrázku 5.1 lze pozorovat rozložení elektrického pole okolo antény. Na horizontálním řezu 5.1b dochází k téměř rovnoměrnému rozložení elektrického pole. Zatímco u vertikálního řezu 5.1a se nadlimitní elektrické pole soustřeďuje okolo ladící kapacity antény. Toto zjištění koresponduje s měřením a simulací elektrického pole před anténou.



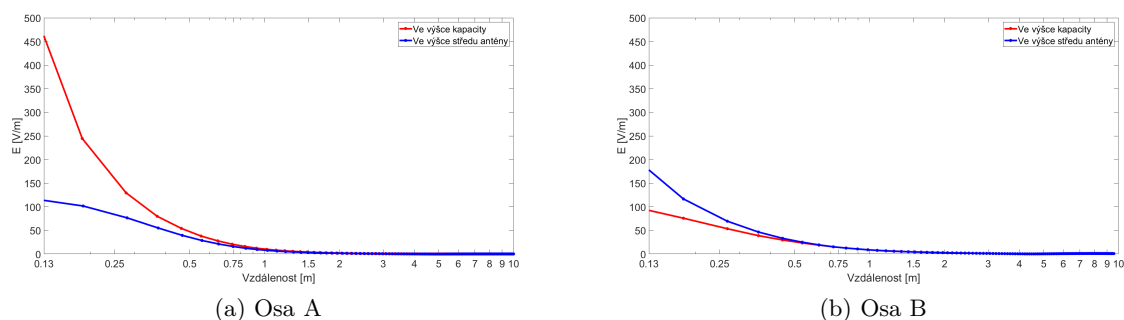
Obrázek 5.1: Tvar elektrického pole po začlenění hygienického limitu

Rozložení magnetického pole okolo antény lze vidět na obrázku 5.2. Z vertikálního řezu 5.2a je možné sledovat, že největší nadlimitní magnetické pole se nachází na ose A. V horizontálním řezu 5.2b má pole téměř kruhový tvar. Z výše zmíněných výsledků je zřejmé, že magnetické pole bude dosahovat největších hodnot na ose A nebo na ose B, které jsou ve stejné výšce jako střed antény. U elektrického pole to není tak zřejmé, proto bylo třeba odsimulovat elektrické pole v závislosti na vzdálenosti od antény ve výšce ladícího kondenzátoru. Výsledky srovnání lze spatřit na grafu 5.3. Na ose A 5.3a je opravdu vyšší intenzita elektrického pole ve výšce kapacity než ve výšce středu antény. Od vzdálenosti jeden metr je tento rozdíl nepatrný. Přesto pro pozdější stanovení bezpečných vzdáleností bude použita závislost elektrického pole ve výšce kapacity. U osy B obr. 5.3b je možné sledovat, že jev je opačný, než tomu bylo u osy A. Proto pro stanovení vzdáleností bude využita závislost ve výšce středu antény.

Veškeré simulace a měření byly nastaveny a změřeny pro výkon 1 W, který je na vstupu do antény, což umožnilo srovnávání výsledků bez přepočtu. Magneticky malá smyčková anténa se samozřejmě nepoužívá jenom s výkonem 1 W, a proto je nutné stanovit bezpečnou vzdálenost od antény v závislosti na výkonu. Této závislosti je docíleno tak, že je-li závislost elektrického nebo magnetického pole v ose s nejvyšší intenzitou podělena referenční hodnotou, jenž je uvedena

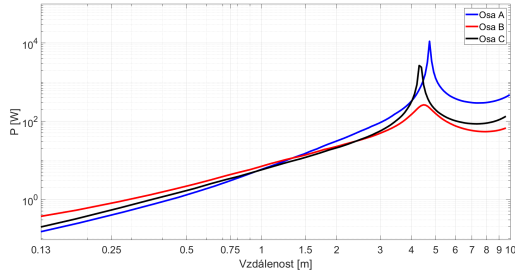


Obrázek 5.2: Tvar magnetického pole po začlenění hygienického limitu

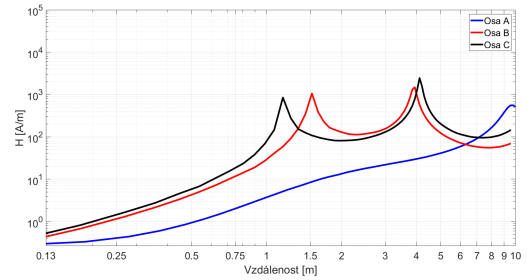


Obrázek 5.3: Srovnání elektrického pole ve výšce kapacity a středu antény

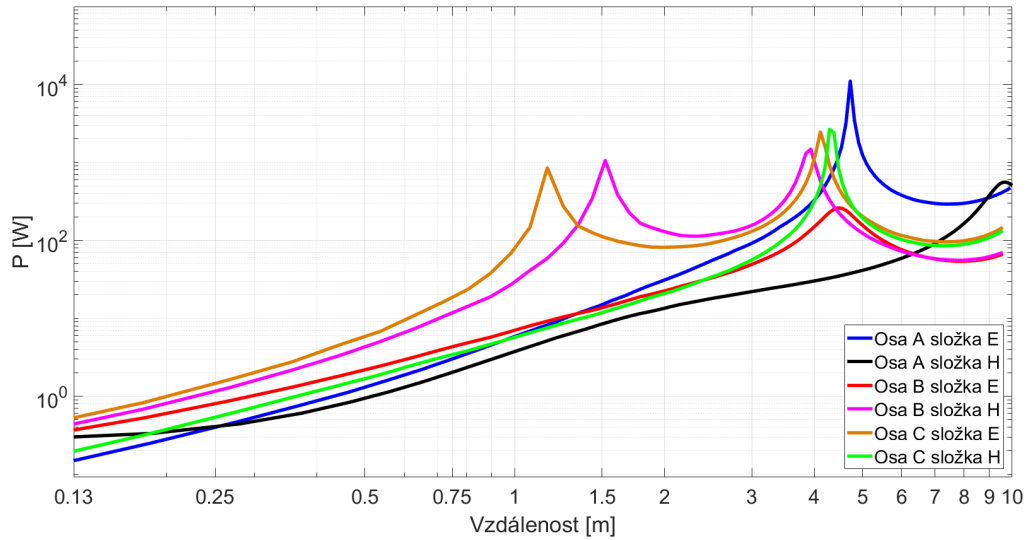
v tabulce 5.1, hodnotou v určité vzdálenosti, výsledek této operace bude právě potřebný výkon, který musí být do antény dodán, aby v té vzdálenosti byla hraniční hodnota. Na grafu 5.4a lze sledovat zmíněnou závislost výkonu na vzdálenosti od antény pro elektrickou složku. Graf má obě osy v logaritmickém měřítku. Z grafu lze vyvodit, že výkon potřebný k referenční hodnotě elektrického pole v určité vzdálenosti je téměř stejně velký ve všech třech osách. Na grafu 5.4b je uvedena závislost pro magnetické pole. U magnetického pole je možné pozorovat, že rozdíly v potřebných výkonech mezi osami jsou výraznější, než tomu bylo u elektrického pole. Také je zřejmé, že osa A má nejmenší potřebný výkon k dosažení hraniční referenční hodnoty magnetického pole. V této ose je tedy největší intenzita magnetického pole. V grafu 5.4c lze sledovat závislost výkonů na bezpečné vzdálenosti od antény jak pro elektrické pole, tak i pro pole magnetické. Z grafu je zřejmé, že rozdíl výkonů mezi některými osami a složkami může být až 50 W. Také z něj vyplývá, že nejdelší bezpečné vzdálenosti dosahuje osa A s magnetickou složkou. Výše zmíněné poznatky, které říkají, že osa A je co do bezpečné



(a) Elektrické pole (plná velikost v příloze E.9)



(b) Magnetické pole (plná velikost v příloze E.10)

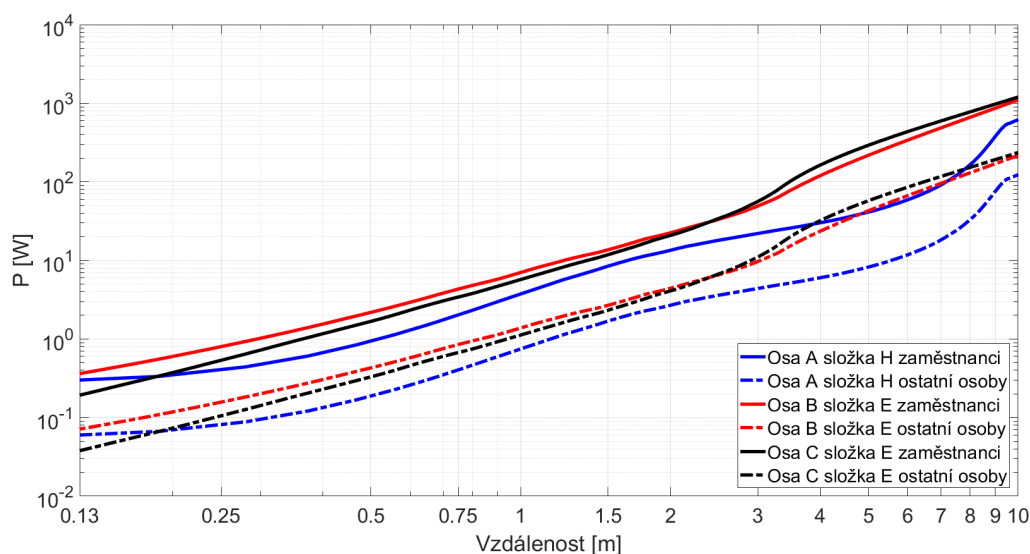


(c) Elektrické a magnetické pole (plná velikost v příloze E.11)

Obrázek 5.4: Závislost výkonů na bezpečné vzdálenosti od antény

vzdálenosti od antény nejpřísnější, korespondují s výsledky výpočtů SAR, které lze spatřit na obrázku 4.9, kde i přes to, že SAR nedosahuje tak velkých hodnot, aby byly překročeny normy, je nejvyšší hodnota SAR v ose A, druhá nejvyšší v ose C a nejnižší je v ose B.

Pro orientační stanovení vzdáleností pro MLA anténu bude využita magnetická složka  $H$  v ose A a elektrická složka v ose B a v ose C. Tyto závislosti byly vybrány proto, že dosahují nejdelších bezpečných vzdáleností od antény v jednotlivých osách. Lze si všimnout, že graf vykazuje jisté anomálie, jež jsou způsobeny tím, že blízké pole antény s rezonanční frekvencí 21 MHz je značně nestabilní a různě kmitá, a proto je potřeba aproximovat závislosti výkonů na bezpečné vzdálenosti od antény. Takto upravené závislosti je možné pozorovat na obrázku 5.5, kde je již jen magnetická složka v ose A a elektrická složka v osách B a C. Čerchovaná čára v grafu představuje bezpečnou vzdálenost dle normy pro ostatní osoby a plná čára zobrazuje bezpečnou



Obrázek 5.5: Aproximovaná závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti od antény (plná velikost v příloze E.12)

vzdálenost pro zaměstnance. Z grafu lze vypočítat, že stačí dodat do antény již relativně malý výkon (desetiny W), aby bezpečná vzdálenost od antény byla v desetinách metru. A při výkonu 100 W, který se udává jako maximální pro tento druh antén, je bezpečná vzdálenost od antény od 4 až do 10 metrů v závislosti na ose od antény. Zmiňované bezpečné vzdálenosti jsou pouze orientační, jedná se však o nejstříktnější variantu, takže by nemělo dojít k tomu, že ve stanovené bezpečné vzdálenosti dojde k překročení limitu intenzity elektrického nebo magnetického pole. Může se stát, že hodnota intenzity bude nižší, protože se nacházíme v blízkém poli antény, která pracuje na relativně nízkém kmitočtu, kde blízké pole snadno ovlivní jakákoliv překážka a tím dojde k pozměnění tvaru pole a jinému rozložení intenzit pole.

Aby bylo ulehčeno stanovení bezpečné vzdálenosti od antény, byla vytvořena tabulka F.1, ve které jsou pro výkony od 1 W až po 100 W s krokem 5 W zapsány bezpečné vzdálenosti v jednotlivých osách. Z praktického hlediska se více hodí, aby pro jednotlivé vzdálenosti od antény byl stanoven výkon, jenž zaručí nepřekročení hygienického limitu. Proto byla vytvořena další tabulka F.2, ve které jsou uvedeny vzdálenosti od antény a v jednotlivých sloupcích je zobrazen výkon, který lze pro danou osu maximálně použít, aby nebyl překročen stanovený limit.

## 6 Závěr

Cílem této diplomové práce byl stručný popis magnetické smyčkové antény, rešerše hygienických limitů, simulace a měření blízkého pole antény, vyhodnocení a stanovení bezpečných vzdáleností od antény.

Protože se celá práce zabývá smyčkovou anténou, jsou v první kapitole uvedeny druhy smyčkových antén. Dále jsou popsány základní části magnetické smyčkové antény, náhradní obvod a časté i méně časté vazební obvody používající se k buzení. Následně je zde uvedeno rozdělení oblastí antény a jednotlivé oblasti jsou stručně charakterizovány. Jsou zde také uvedeny vzorce pro výpočet rozměrů jednotlivých oblastí a v neposlední řadě jsou zde uvedeny vypočtené rozměry všech oblastí antény, kterou se práce zabývá. V poslední řadě jsou uvedeny a popsány veličiny používající se pro charakteristiku elektromagnetického záření, zejména v blízké oblasti antény.

Druhá kapitola se zabývá hygienickými limity před neionizujícím zářením. Je zde uveden výňatek z platného nařízení vlády č. 291/2015 Sb., jenž stanovuje pro Českou republiku maximální povolené limity pro elektromagnetické záření. Jako další je zde úvod do problematiky elektromagnetické kompatibility, protože silné elektromagnetické záření nemusí ohrožovat nejenom lidské zdraví, ale i elektrická zařízení, která v konečném důsledku udržují člověka naživu. Také jsou zde zmíněny účinky elektromagnetického pole, které jsou nejdříve rozděleny a poté dle frekvence charakterizovány. Jsou zde popsány negativní, ale také i pozitivní účinky elektromagnetického záření, potažmo magnetického záření na lidský organismus.

Jelikož se práce zabývá i měřením blízkého pole, jsou v třetí kapitole uvedeny senzory pro měření magnetického pole. Jsou zde probrány nejznámější senzory. U jednotlivých senzorů je vysvětlen princip jejich fungování při měření magnetického pole.

Čtvrtá kapitola se zabývá již simulací a měřením blízkého pole antény. Pro simulaci blízkého pole byl využit program CST studio, do kterého nejdříve musela být namodelována již vyrobená anténa, následně byla v tomto programu doladěna na rezonanční kmitočet. Anténa byla vyrobena pro radioamatérské pásmo, které se nachází 21–21,345 MHz. Anténa v simulačním programu dosahovala nejlepší rezonance na kmitočtu 21,105 MHz. Pro tuto frekvenci bylo dále simulováno blízké pole antény. Simulační program CST studio umožňuje výpočet SAR, musí však být definován ztrátový materiál, ve kterém se SAR bude počítat. Proto byla přidána koule představující lidskou hlavu z materiálu, který má stejné elektrické a magnetické vlastnosti jako má lidská tkáň. Po výpočtu se však ukázalo, že hodnoty SAR dosahují na této kouli malých hodnot i při velkých výkonech. Malé hodnoty SAR byly způsobeny tím, že byla namodelována pseudohlava lidského těla. Lepších výsledků SAR by se docílilo s použitím přesného modelu celého lidského těla, avšak tento model je velice složitý a náročný na výpočetní čas. Protože nařízení vlády stanovuje referenční hodnoty pro intenzitu elektrického a magnetického pole, není

potřebné pro stanovení bezpečné vzdálenosti od antény vypočítávat SAR. Dále je v této kapitole popsáno měření blízkého pole antény. Anténa v reálném prostředí nejlépe rezonuje na frekvenci 21,24 MHz, což je sice jiná frekvence než u simulace, ale parametr vstupní odrazivosti antény  $S_{11}$  se pohybuje v obou případech okolo -24 dB. Měření bylo rozděleno na dvě části. V první části se měřilo na dvou přímkách, které jsou na sebe navzájem kolmé, do vzdálenosti 10 m. V druhé části se měřilo na čtvercové ploše před anténou. Při porovnání naměřených a odsimulovaných hodnot lze pozorovat jisté odchylky. Příčinám těchto odchylek je věnována poslední část této kapitoly.

Poslední kapitola se zabývá stanovením bezpečných vzdáleností od antény. Jsou zde uvedeny nejvyšší přípustné hodnoty intenzity elektrického i magnetického pole jak pro ostatní osoby, tak i pro zaměstnance. Jelikož simulační program CST studio i měřicí přístroj neuváděl intenzitu magnetického pole, ale magnetickou indukci, je zde uveden přepočtení vztah a také přepočítané nejvyšší přípustné hodnoty pro magnetické pole. Dále jsou zde zobrazeny grafy, představující závislosti vstupních výkonů na bezpečné vzdálenosti od antény. Nejprůběžnější osa, vzhledem k bezpečné vzdálenosti, je osa A s magnetickou složkou, potom osa C s elektrickou složkou a nakonec osa B také s elektrickou složkou. Tyto tři závislosti tvoří výsledný graf, který stanovuje bezpečné vzdálenosti od antény ve všech třech osách od antény. V grafu jsou jak závislosti pro ostatní osoby, tak i pro zaměstnance. Tento graf byl pak zdrojem pro vytvoření dvou tabulek. První obsahuje bezpečné vzdálenosti v jednotlivých osách v závislosti na výkonu. Druhá tabulka má maximální povolený výkon takový, aby nedošlo k překročení stanovených hodnot v jednotlivých osách. Tyto tabulky mají za úkol ulehčit uživateli antény stanovení bezpečné vzdálenosti od antény.

I přes mnohá úskalí simulací, zejména pak výpočtů SAR, měření a stanovení bezpečných vzdáleností od antény, lze považovat výsledky simulací a reálná měření za zdařilá. Při porovnání odsimulovaných a naměřených hodnot lze vidět jisté odchylky, ty jsou však způsobeny tím, že do simulačního programu nelze zahrnout veškeré faktory ovlivňující reálné měření. Při stanovených bezpečných vzdálenostech by nemělo dojít k tomu, že intenzita elektrického nebo magnetického pole bude nadlimitně vyšší, avšak může se stát, že hodnoty mohou být i několikanásobně nižší, protože se tvar a tím i velikost blízkého pole snadno změní, jako tomu bylo při reálném měření.

## Literatura

- [1] *ELEKTRONICKY LADĚNÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA PRO KMITOČTY DO 30 MHZ* Brno, Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/wwwbase/zavprace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=68783](https://www.vutbr.cz/wwwbase/zavprace_soubor_verejne.php?file_id=68783)
- [2] BURGER, Oldřich a Marek DVORSKÝ. *Magnetická smyčková anténa: pokaždé trochu jinak*. Ostrava: EDUCA TV, 2015. ISBN 9788026074854.
- [3] *MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ POLE V BLÍZKÉ ZÓNĚ* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/wwwbase/zavprace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26823](https://www.vutbr.cz/wwwbase/zavprace_soubor_verejne.php?file_id=26823)
- [4] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design* [CD-ROM]. 3rd ed. Hoboken: Wiley, c2005. ISBN 0-471-66782-X.
- [5] HUANG, Yi. a Kevin. BOYLE. *Antennas: from theory to practice*. 2. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 9780470510285.
- [6] DARMOVÁ, Vilibalda. *Ionizujúce a neionizujúce žiarenie*. Brno: Tribun EU, 2009. Librix.eu. ISBN 978-807399-814-1.
- [7] *Nariadení vlády o ochrane zdravia pred neionizujúcim žiarením*. In: . Česká republika: Vláda ČR, 2010, ročník 2010, číslo 106.
- [8] *Jak se měří SAR* [online]. Praha: mobilmania.cz, 2004 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.mobilmania.cz/titulni-strana/jak-se-meri-sar/sr-1-sc-21-a-1107762/default.aspx>
- [9] *D Modelování elektromagnetického pole v tkáni* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/wwwbase/zavprace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=64371](https://www.vutbr.cz/wwwbase/zavprace_soubor_verejne.php?file_id=64371)
- [10] *Nariadení vlády o ochrane zdravia pred neionizujúcim žiarením*. In: . Česká republika: Vláda ČR, 2015, ročník 2015, číslo 291.
- [11] *Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc., Elektromagnetická kompatibilita*. Brno, 2002. Vysokoškolské skripta. VUT Brno.
- [12] *BC. JINDŘICH, Kulík. ELEKTROMAGNETICKÁ INTERFERENCE KARDIOSTIMULÁTORŮ*. Brno, 2008. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT Brno.
- [13] *LOJKOVÁ, Lea. KARDIOSTIMULÁTORY A ZDROJE RUŠENÍ*. Brno, 2009. Závěrečná práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.

- [14] PEKÁREK, Luděk, Pavel ŠÍSTEK a Lukáš JELÍNEK. *Neionizující záření: expozice a zdravotní rizika*. Praha: Státní zdravotní ústav, 2006. ISBN 80-707-1276-7
- [15] ČSN EN 60601-1. *Zdravotnické elektrické přístroje*. 2. Česká republika: Český normalizační institut, 2007.
- [16] ROZMAN, Jiří. *Elektronické přístroje v lékařství*. Praha: Academia, 2006. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1308-3.
- [17] ROZMAN, Jiří a Zdeněk POSPÍCHAL. *Ekologické inženýrství*. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. Phare. ISBN 80-707-8373-7.
- [18] ROZMAN, Jiří. *Terapeutická technika*. Brno: Vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-214-1488-X.
- [19] STAFFA, Bc. Erik. *Měření parametrů elektromagnetického pole vyzařovaného zdravotnickými přístroji*. Brno, 2010. Závěrečná práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Mgr. Daniel Vlk, CSc.
- [20] O magnetoterapii - Nejdůležitější účinky. *ANO ZDRAVÍ* [online]. Česká republika: Magnetoterapie Renaissance, 2015 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: [http : //www.anozdravi.cz/magnetoterapie.html](http://www.anozdravi.cz/magnetoterapie.html)
- [21] Magnetoterapie *WIKISKRIPTA* [online]. Česká republika: MEFANET, 2017 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: [https : //www.wikiskripta.eu/w/Magnetoterapie](https://www.wikiskripta.eu/w/Magnetoterapie)
- [22] *Hallův jev: Encyklopedie fyziky* [online]. Brno: Jaroslav Reichl, Martin Všeticka, 2006 [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: [http : //fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev](http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev)
- [23] *Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. princip: Automatizace.hw.cz rady a poslední novinky z oboru* [online]. Praha: Antonín Vojáček, 2007 [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: [https : //automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip](https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip)
- [24] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0114-4.
- [25] *Integrované AMR senzory magnetického pole: Automatizace.hw.cz rady a poslední novinky z oboru* [online]. Praha: Antonín Vojáček, 2011 [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: [https : //automatizace.hw.cz/integrované-amr-senzory-magnetickeho-pole](https://automatizace.hw.cz/integrované-amr-senzory-magnetickeho-pole)
- [26] *GMR senzory mag. pole - 1. díl - princip a struktura: Automatizace.hw.cz rady a poslední novinky z oboru* [online]. Praha: Antonín Vojáček, 2011 [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: [https : //automatizace.hw.cz/gmr-senzory-mag-pole-1-dil-princip-a-struktura](https://automatizace.hw.cz/gmr-senzory-mag-pole-1-dil-princip-a-struktura)



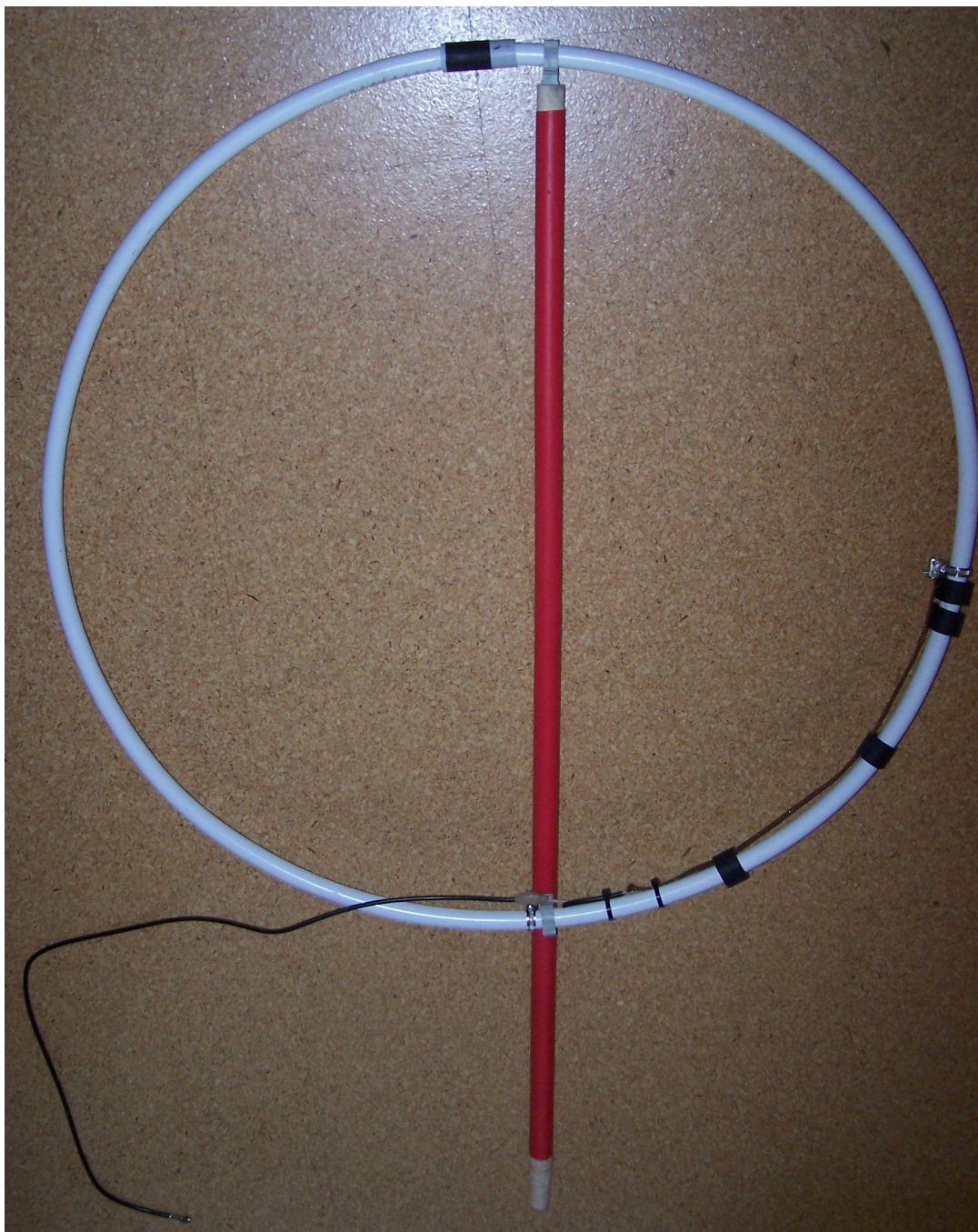
- [27] *TMR - Tunelová magnetoresistence - 1. díl - princip: Automatizace.hw.cz rady a poslední novinky z oboru* [online]. Praha: Antonín Vojáček, 2011 [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: [https :  
//automatizace.hw.cz/tmr – tunelova – magnetoresistence – 1 – dil – princip](https://automatizace.hw.cz/tmr-tunelova-magnetoresistence-1-dil-princip)

## A Obsah el. přílohy

Obsah elektronické přílohy:

- *soubory\_cst.zip*,
- *m\_soubory.zip*.

## B Anténa



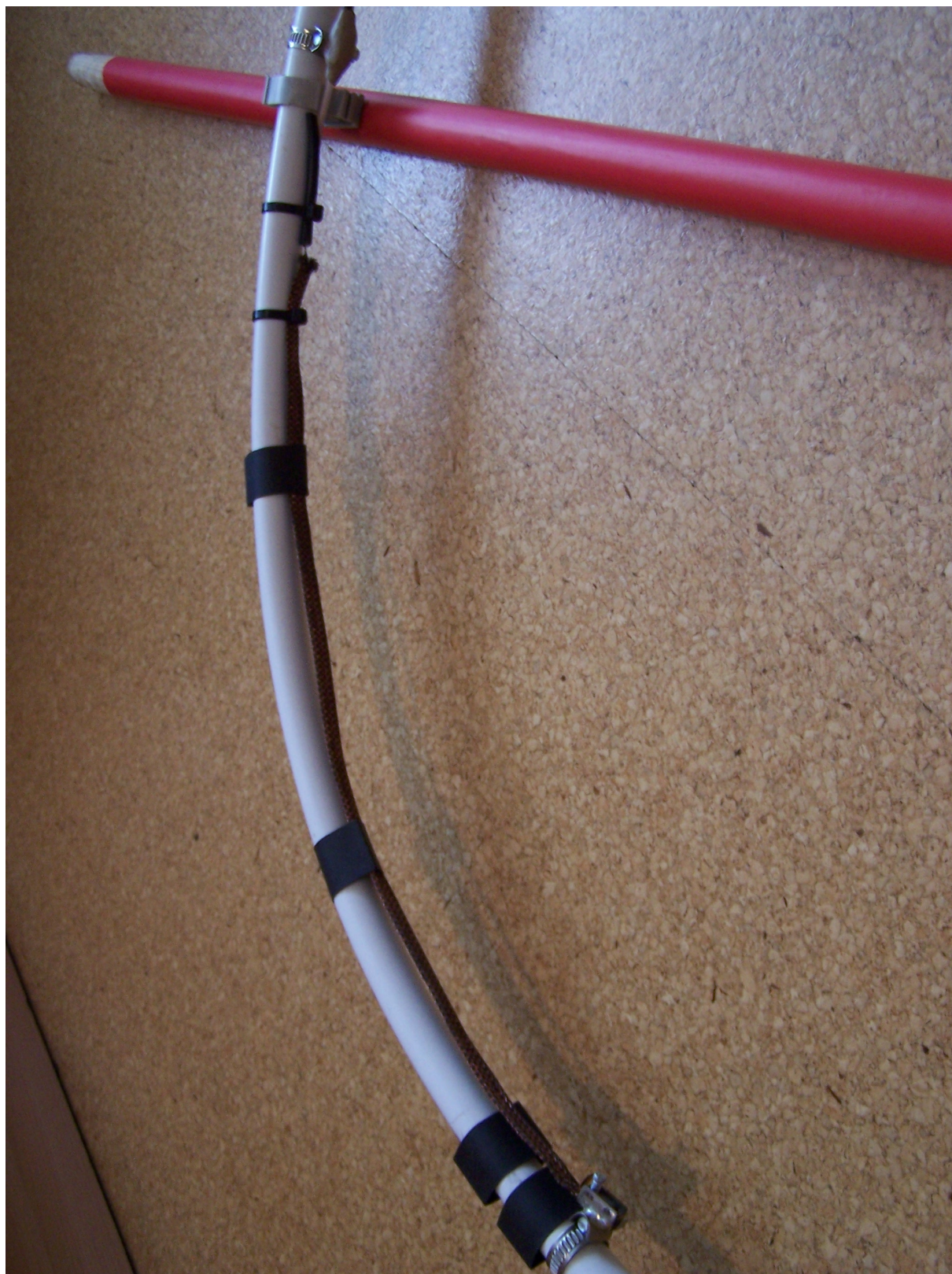
Obrázek B.1: MLA anténa 21 MHz





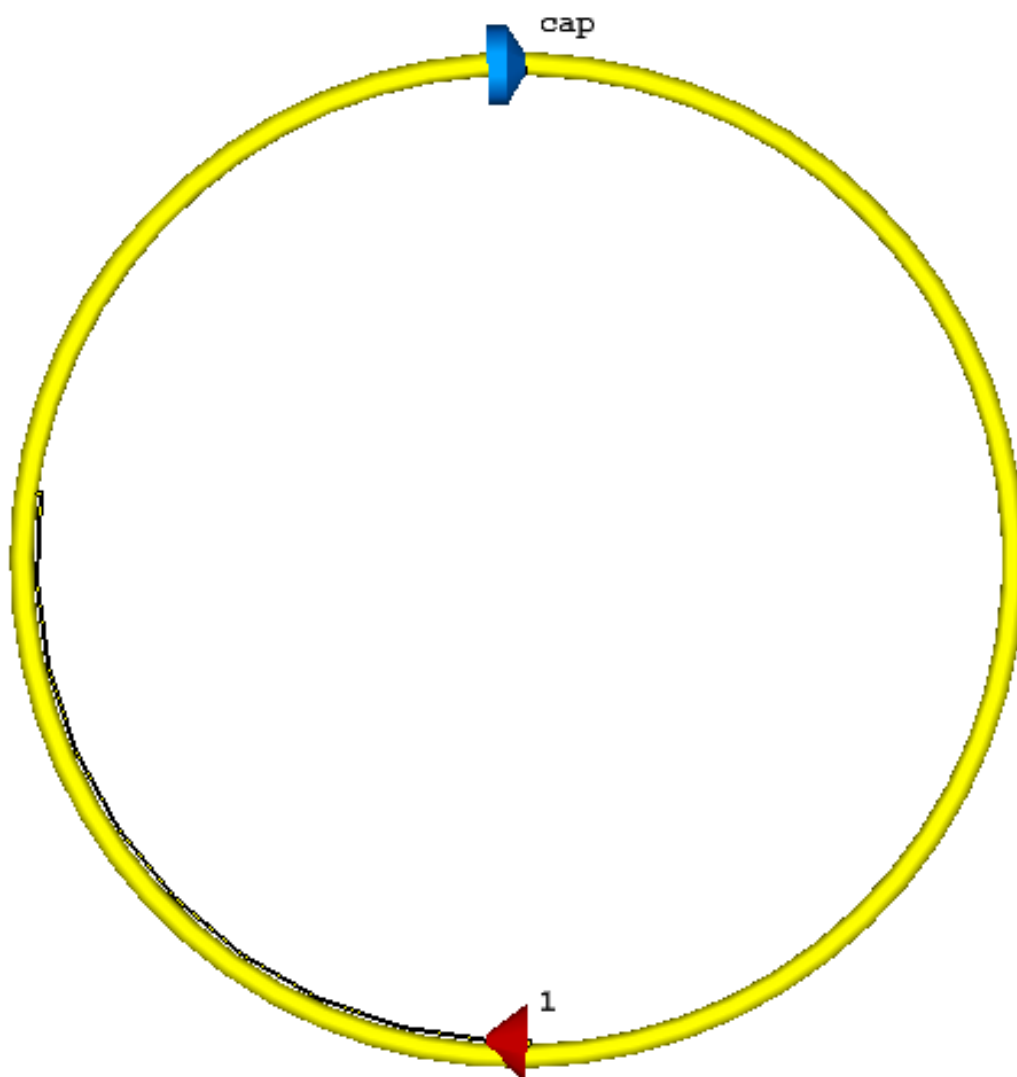
Obrázek B.2: Laditelná kapacita antény



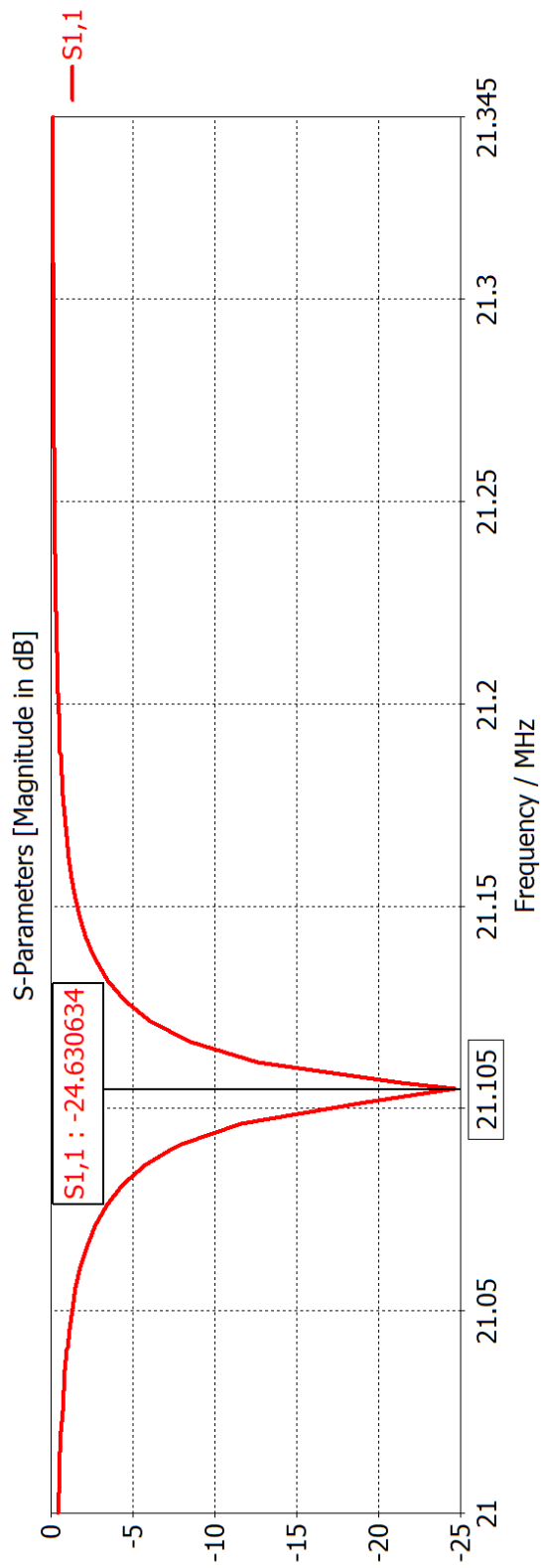


Obrázek B.3: GAMA pohyblivé antény

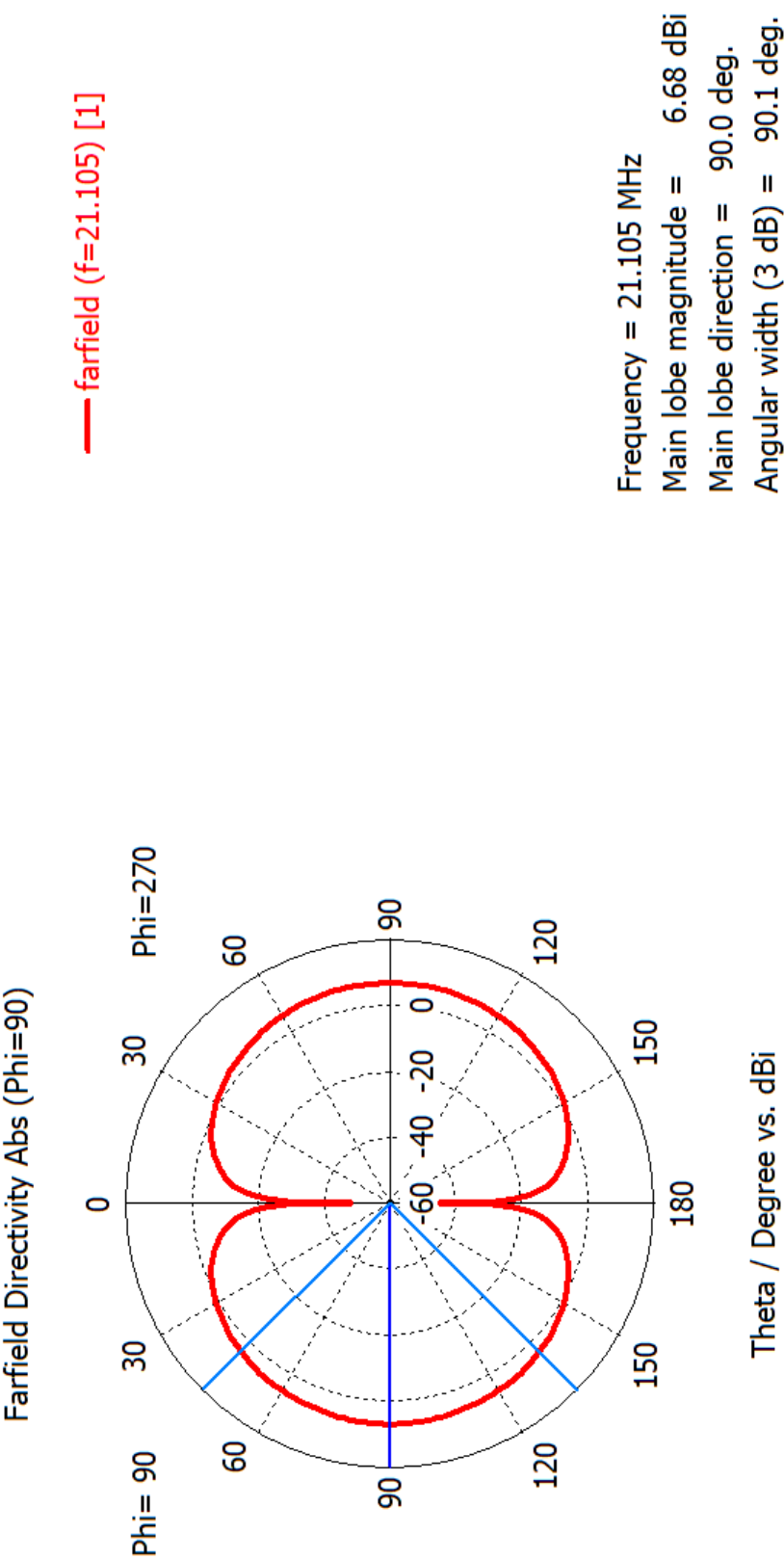
## C Simulace



Obrázek C.1: Namodelovaná MLA anténa

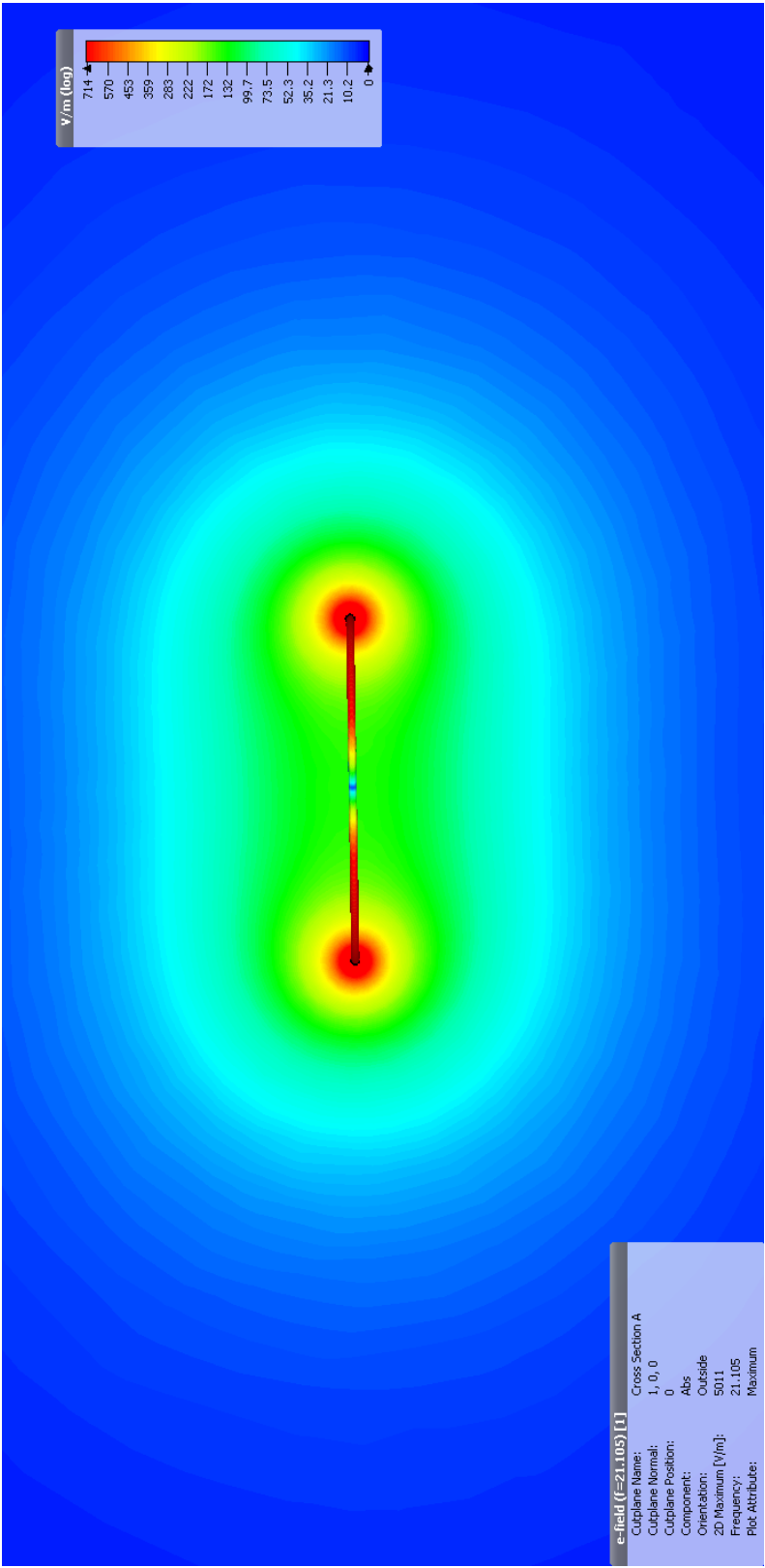


Obrázek C.2: Simulace S11 MLA antény

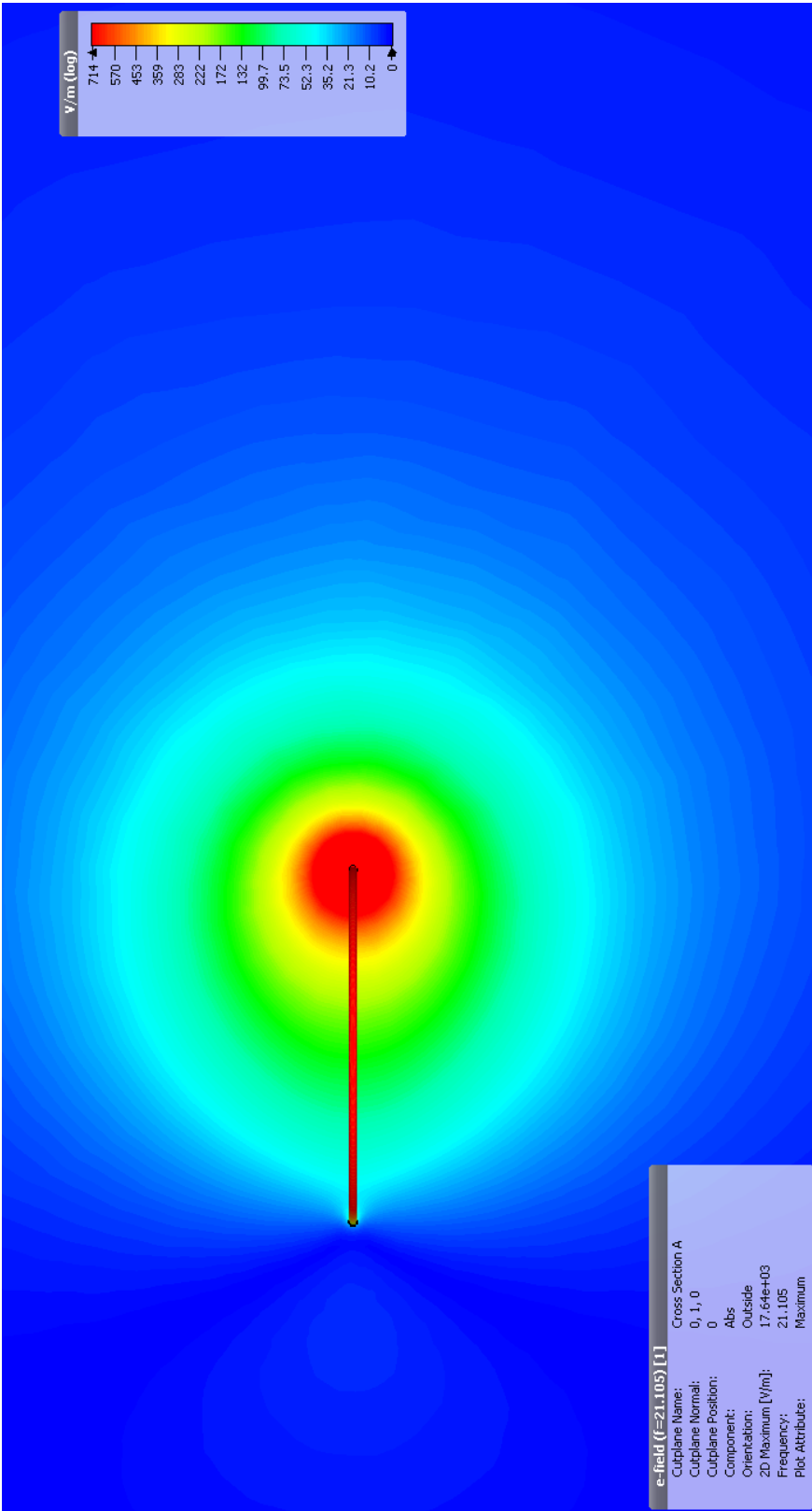


Obrázek C.3: Směrová charakteristika

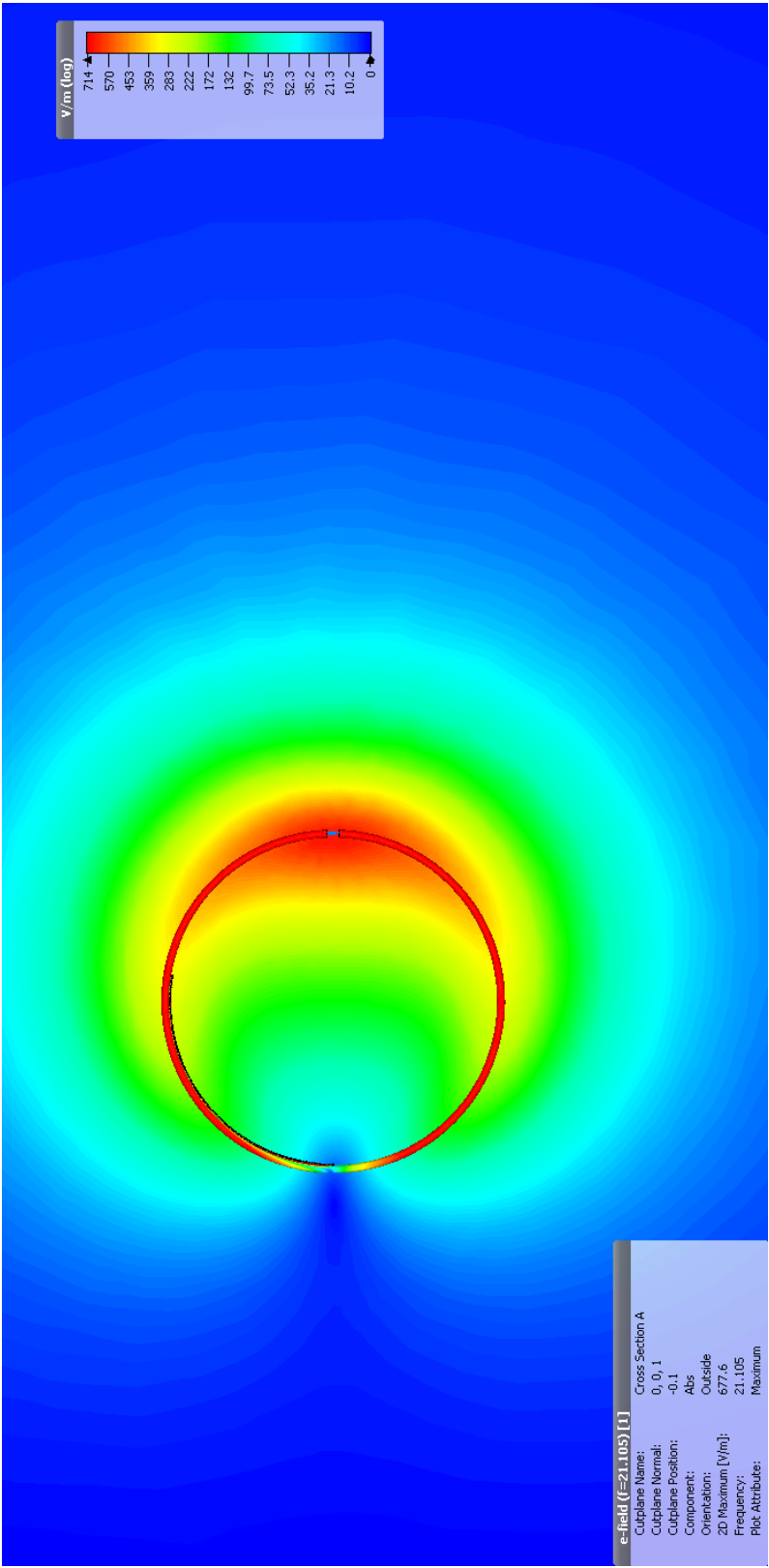




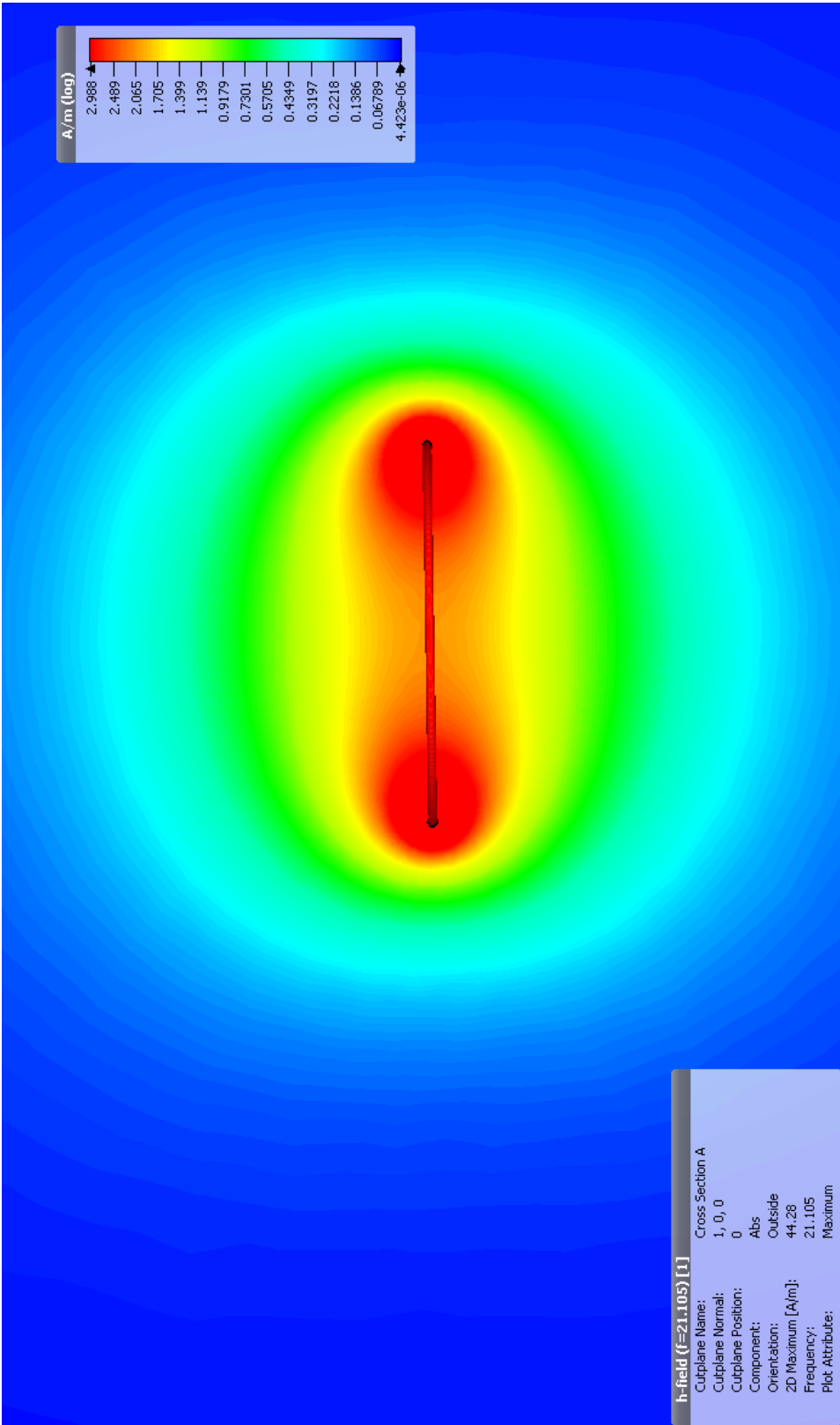
Obrázek C.4: Složka E horizontální řez



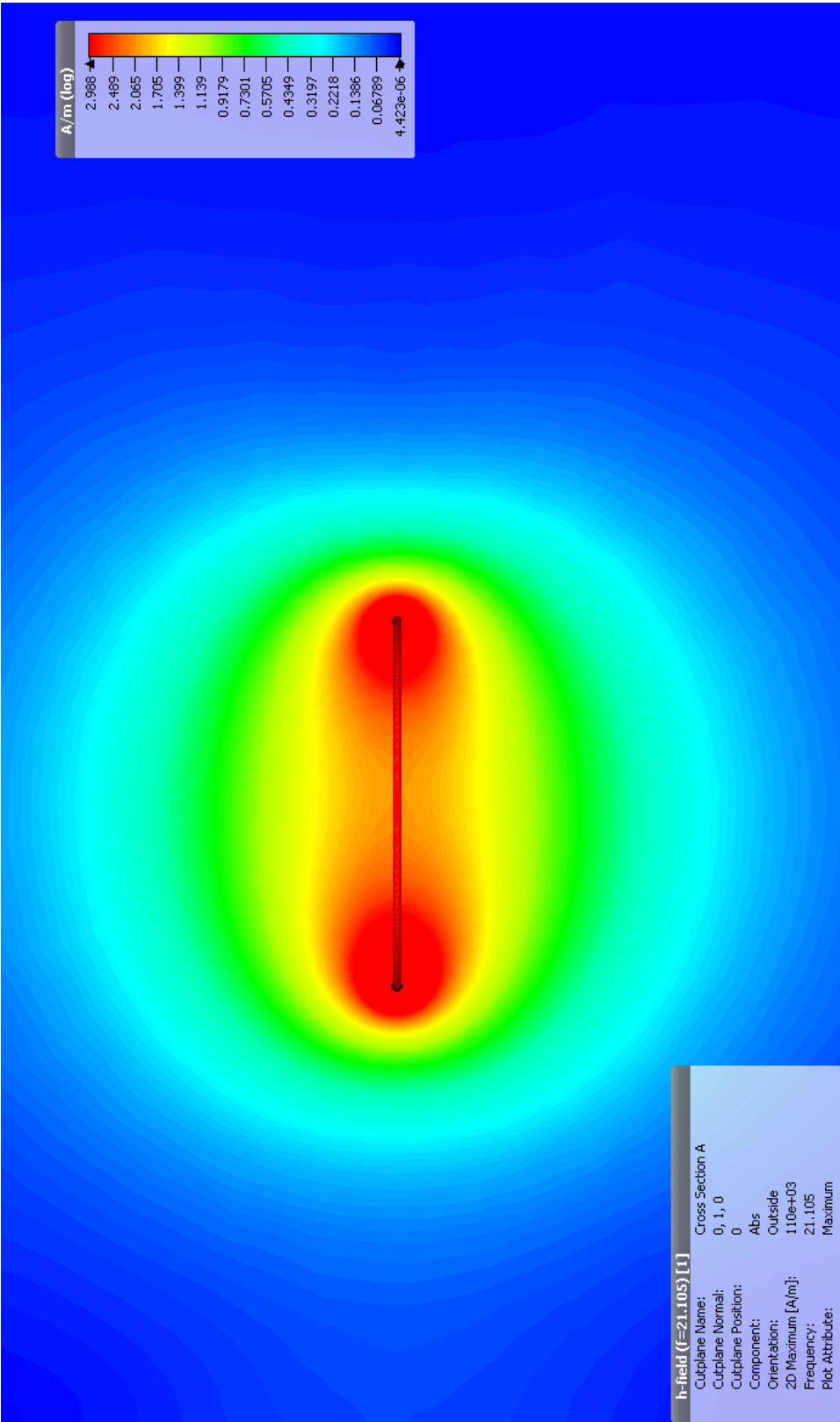
Obrázek C.5: Složka E vertikální řez



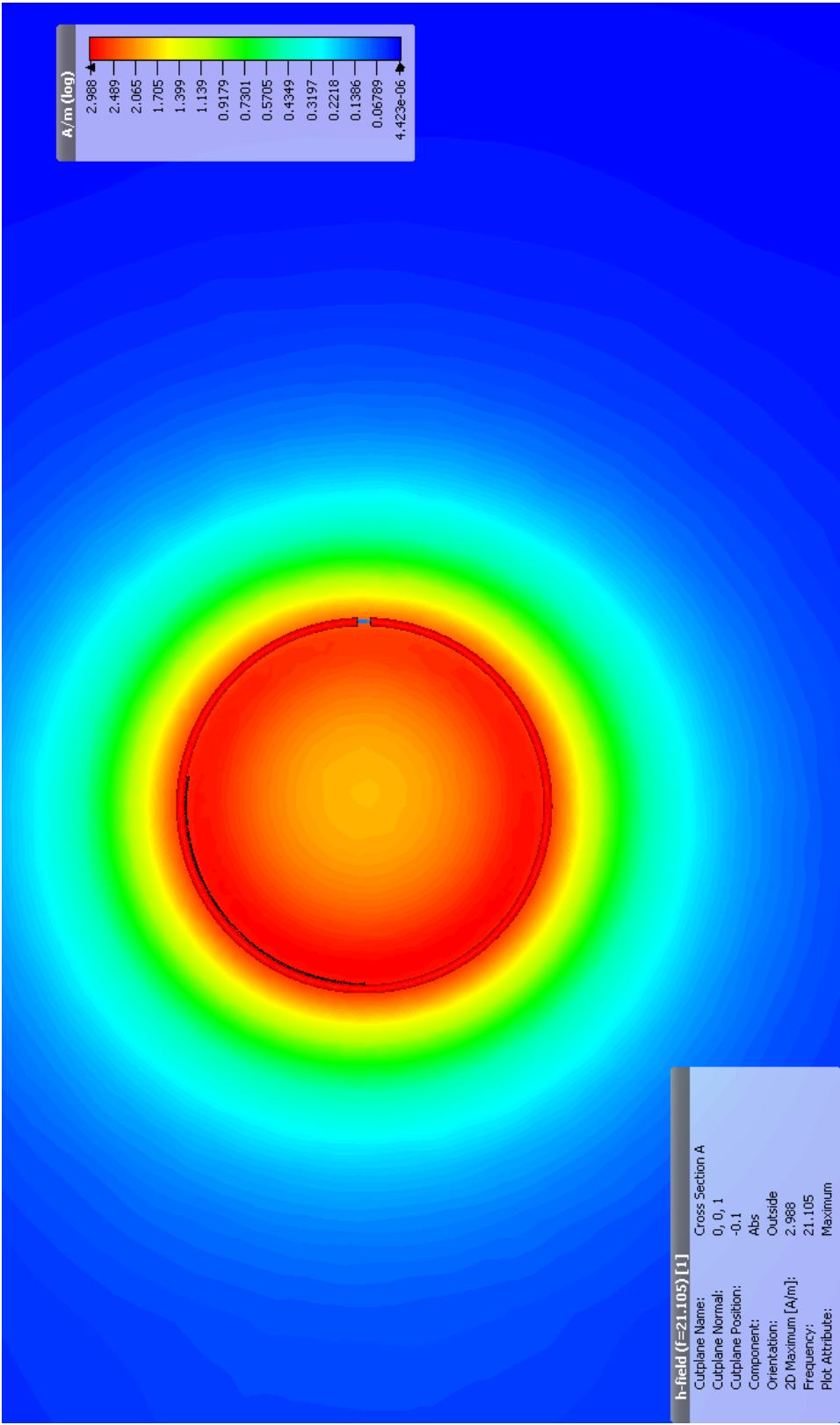
Obrázek C.6: Složka E 100 mm před anténou



Obrázek C.7: Složka H horizontální řez

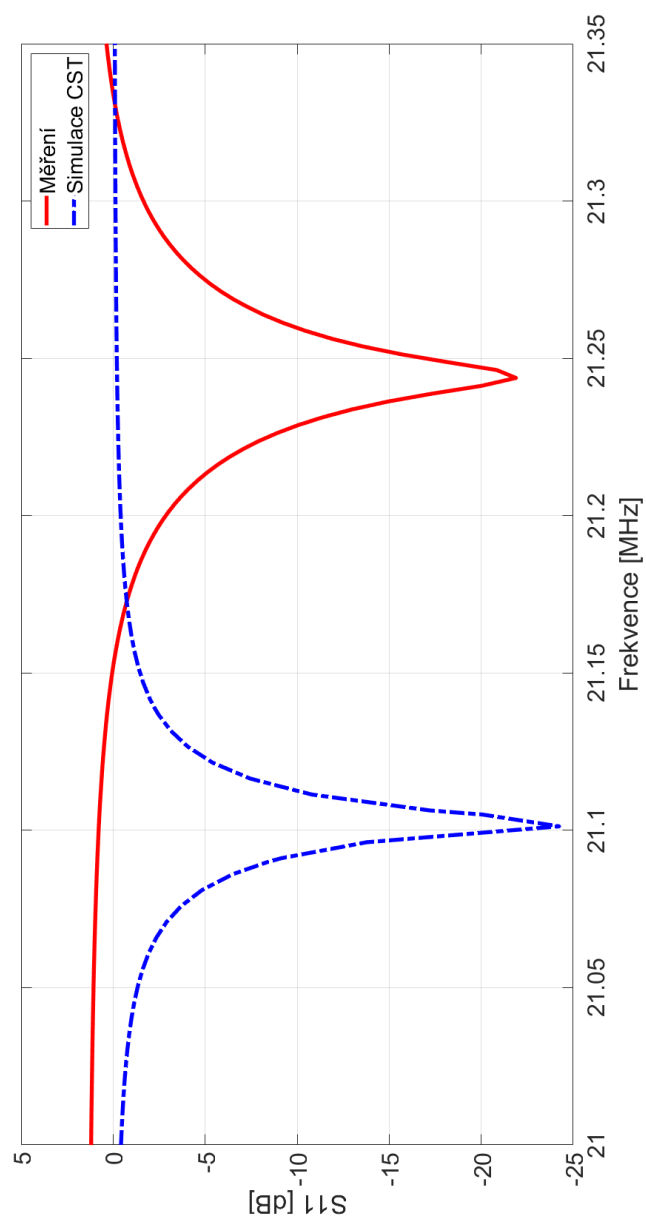


Obrázek C.8: Složka H vertikální řez



Obrázek C.9: Složka H 100 mm před anténou

## D Měření



Obrázek D.1: Průběh  $S_{11}$  v otevřeném prostoru





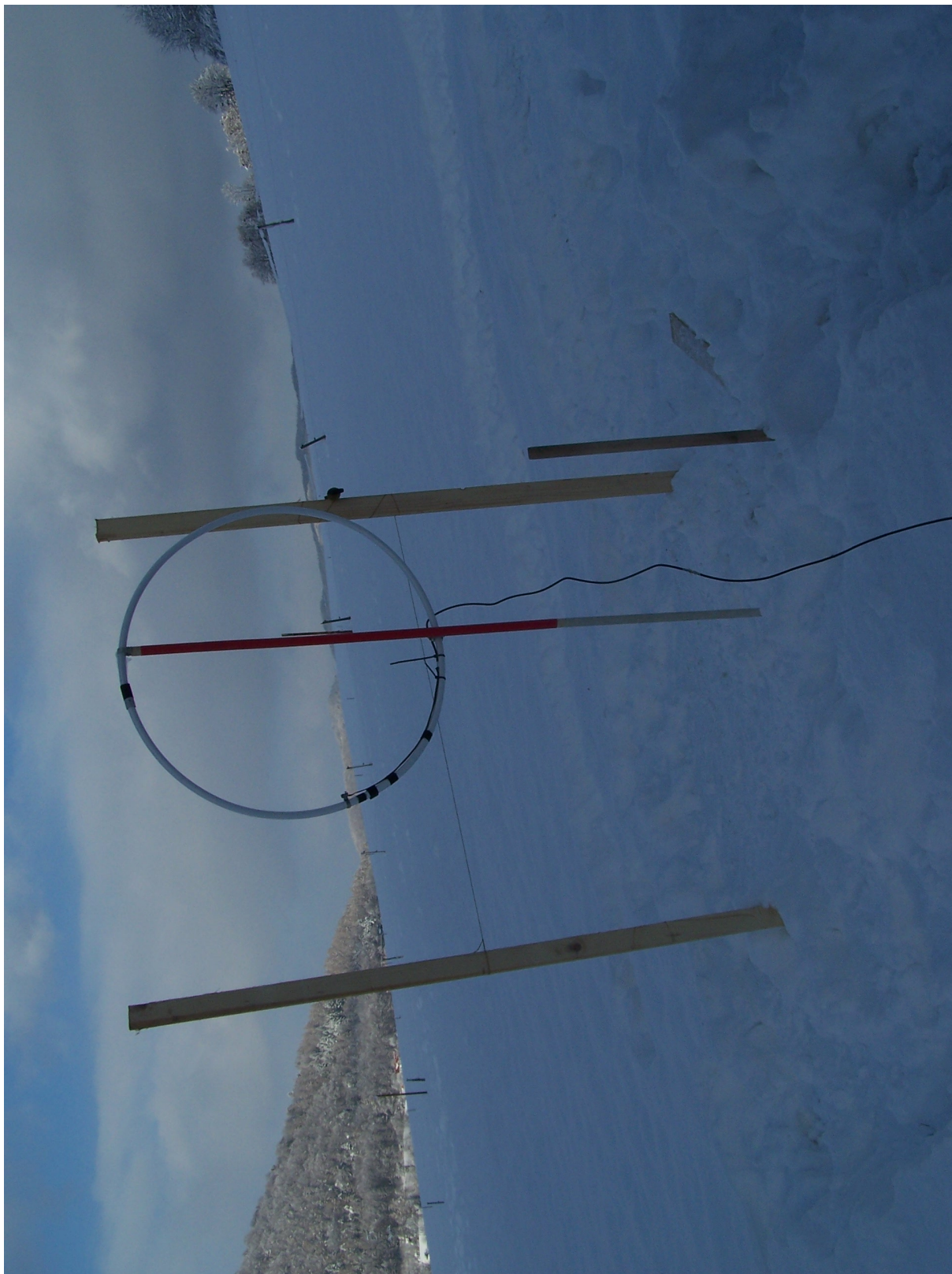
Obrázek D.2: Měření osy A





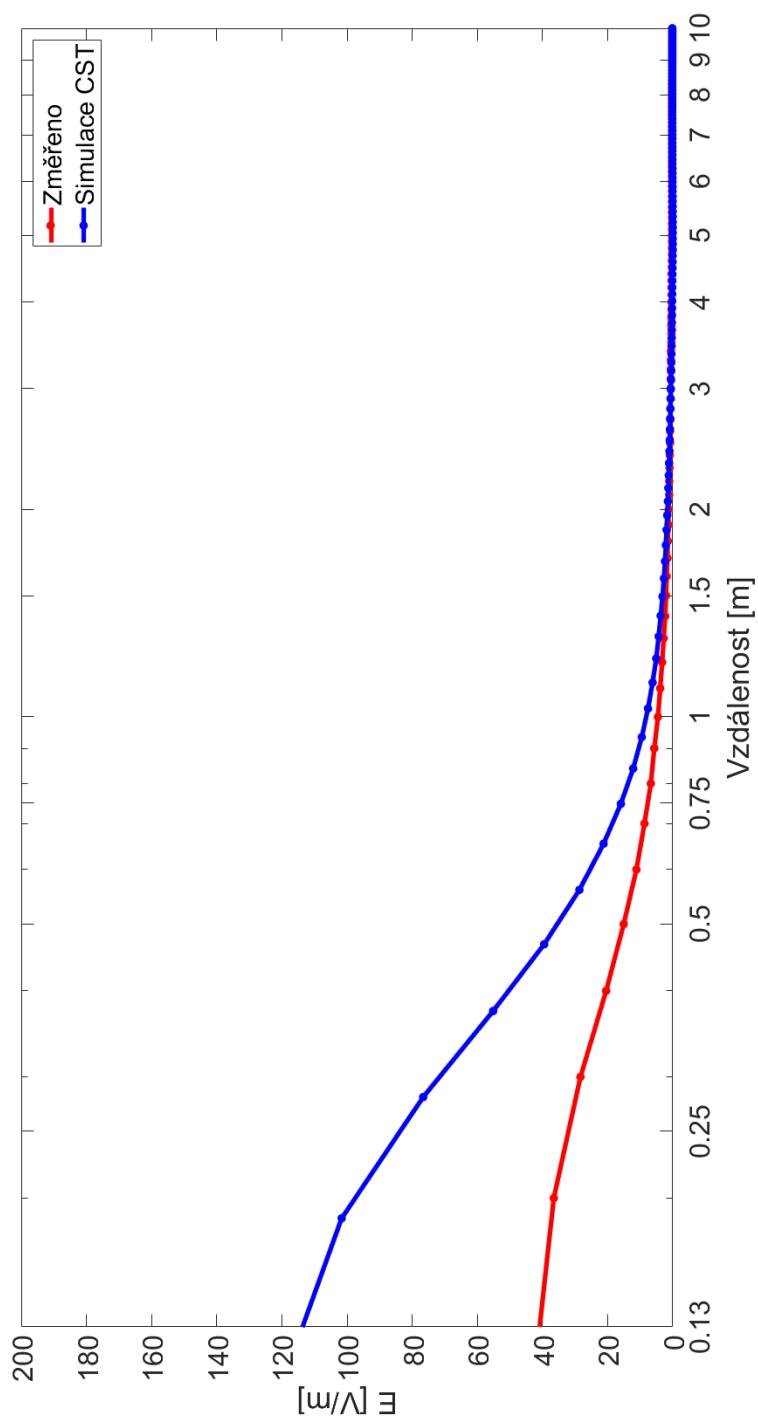
Obrázek D.3: Měření osy B



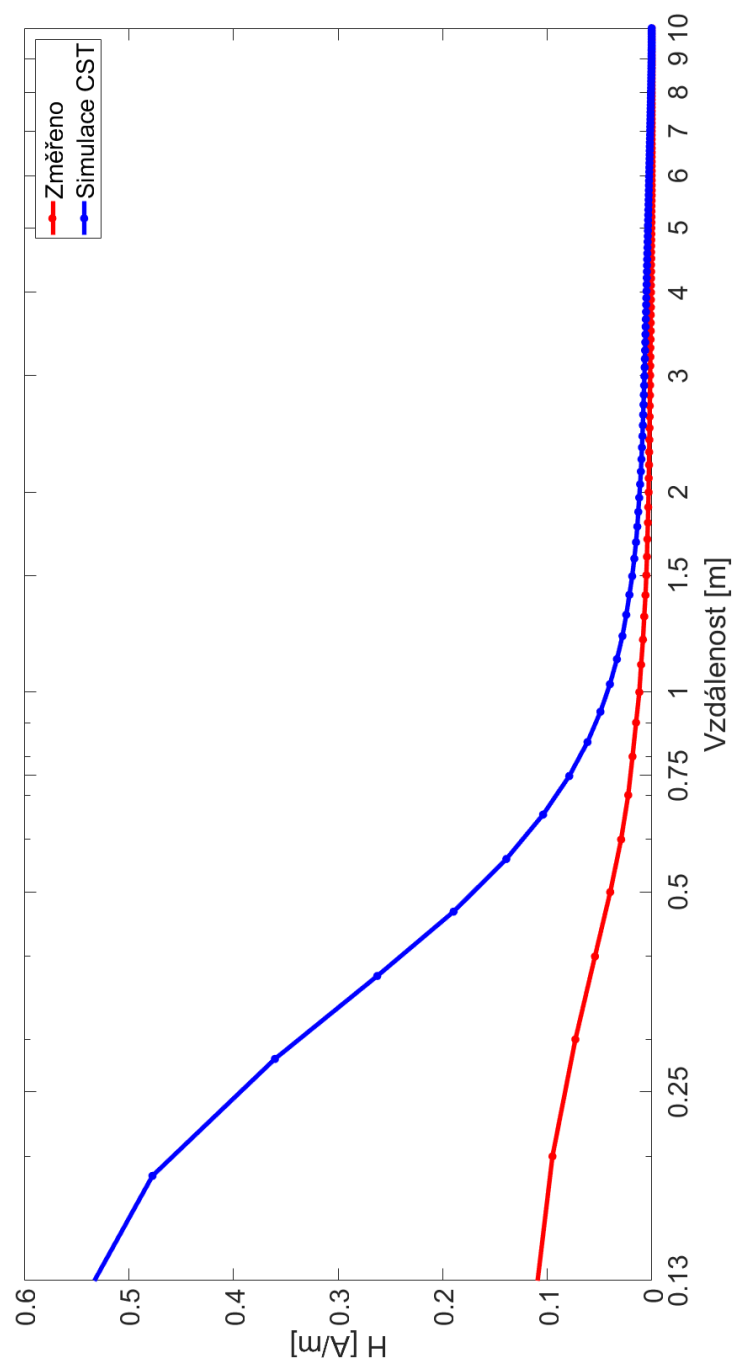


Obrázek D.4: Měření půl metru před anténou

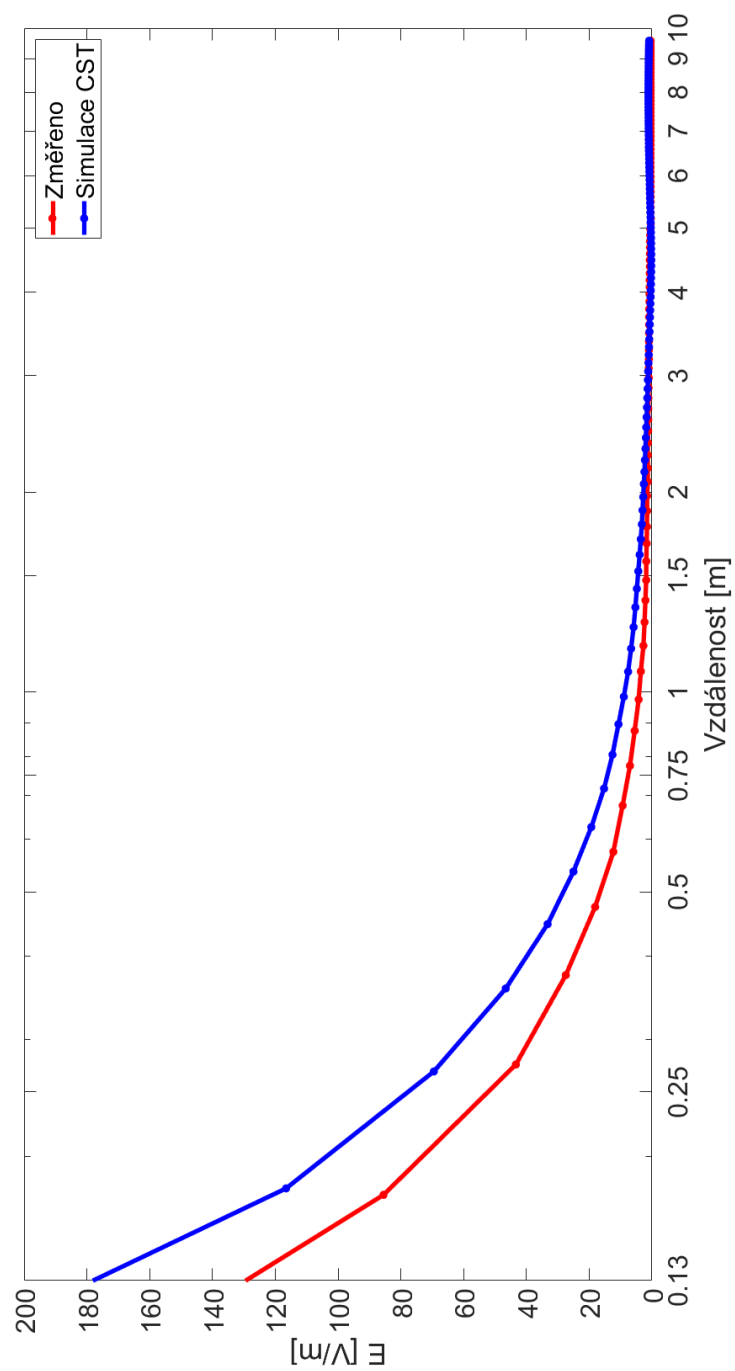
## E Grafy



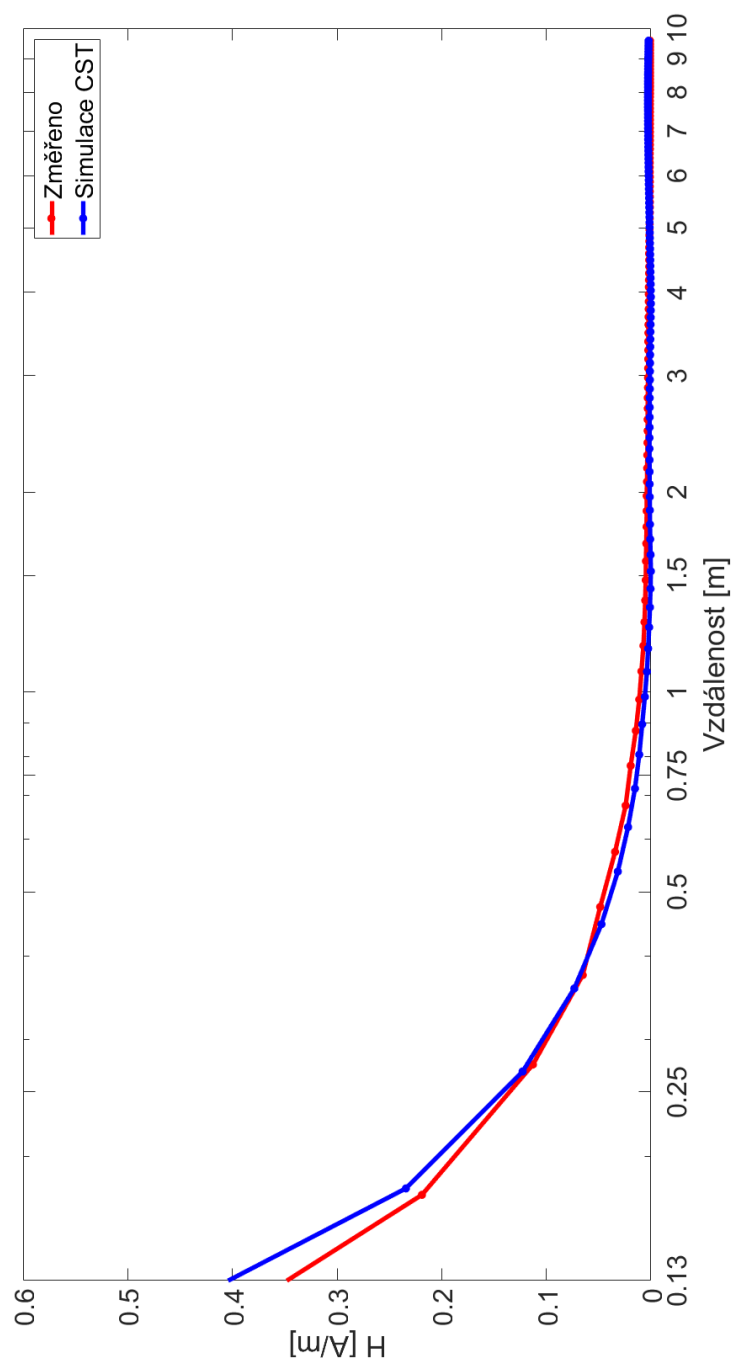
Obrázek E.1: Závislost elektrického pole na vzdálenosti od antény osa A



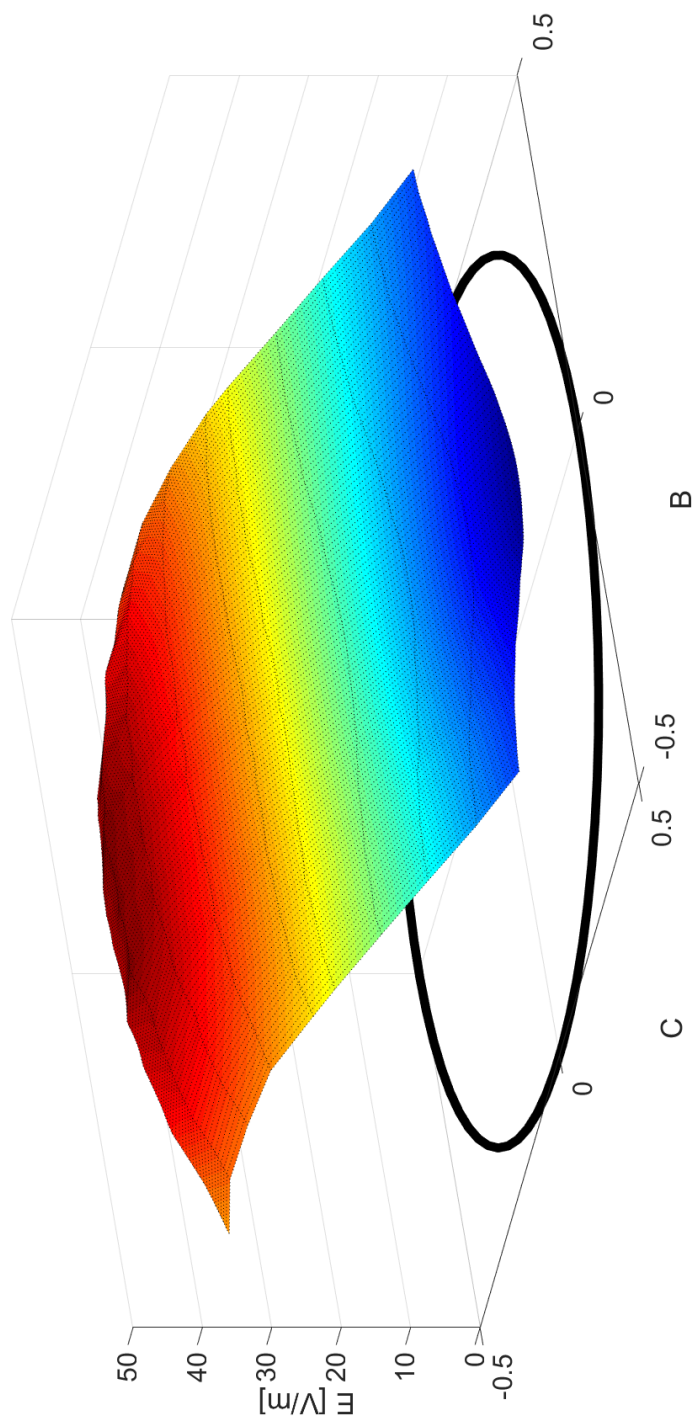
Obrázek E.2: Závislost magnetického pole na vzdálenosti od antény osa A



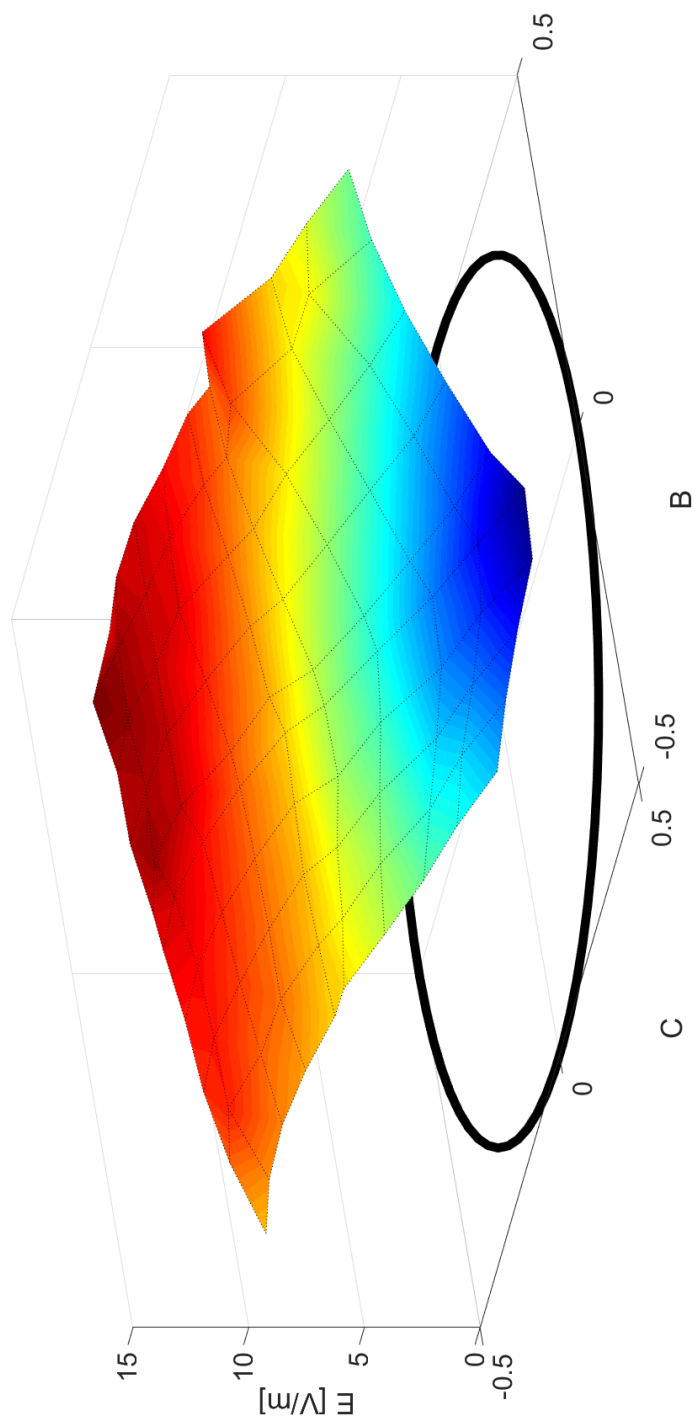
Obrázek E.3: Závislost elektrického pole na vzdálenosti od antény osa B



Obrázek E.4: Závislost magnetického pole na vzdálenosti od antény osa B

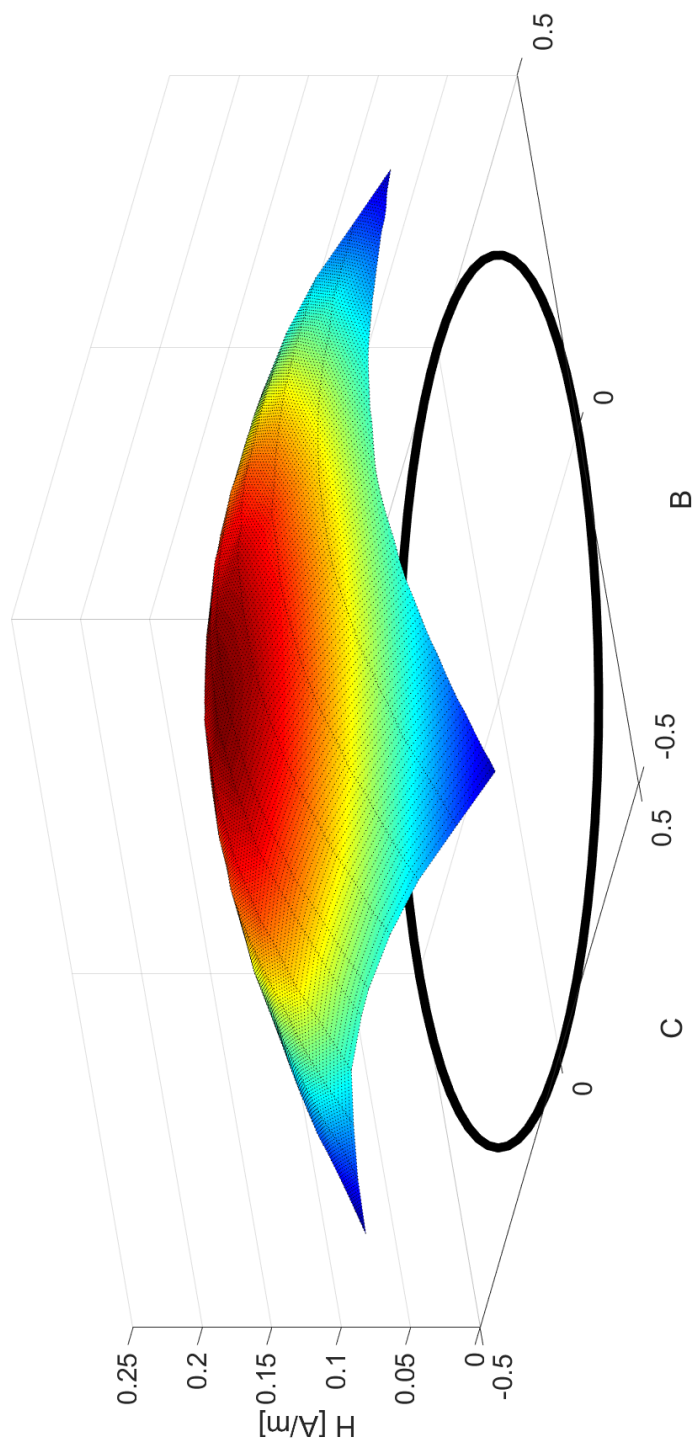


Obrázek E.5: Složka  $E_z$  0,5 m před anténou CST

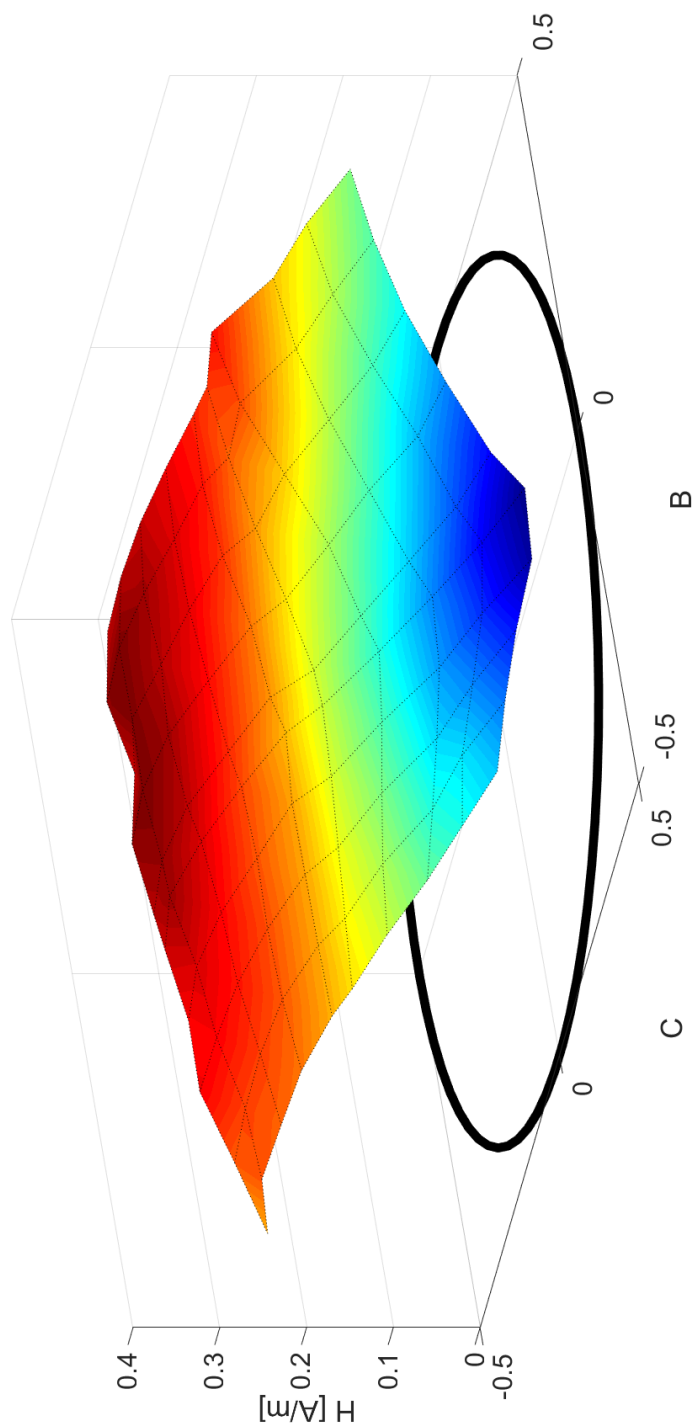


Obrázek E.6: Složka  $E$  0,5 m před anténou změřeno

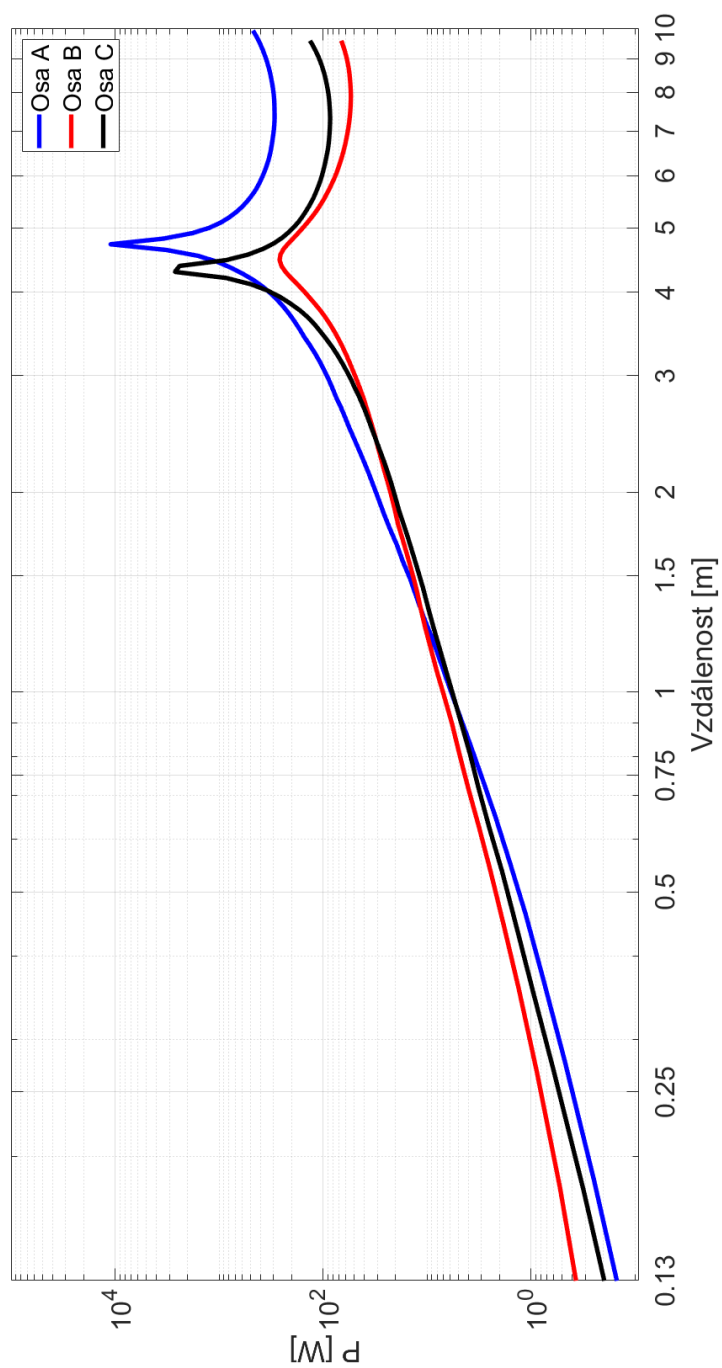




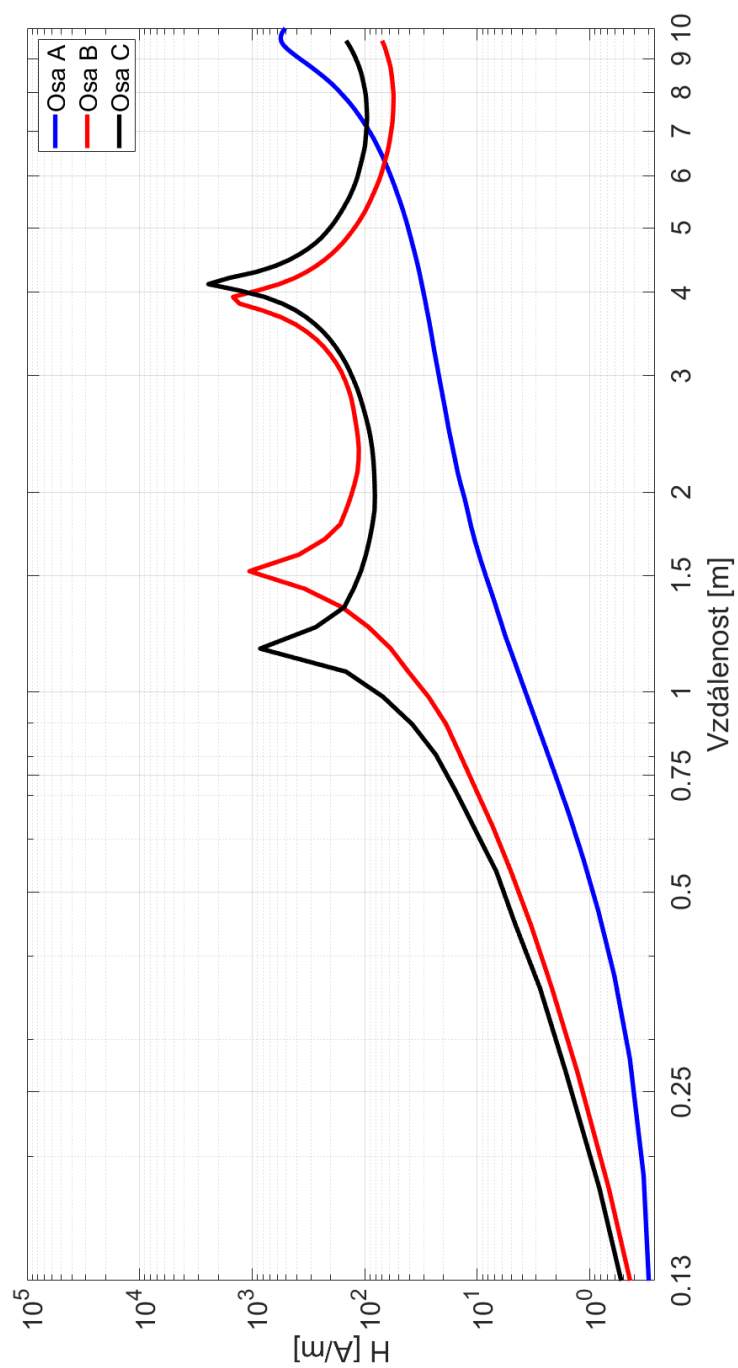
Obrázek E.7: Složka  $H$  0,5 m před anténou změřeno



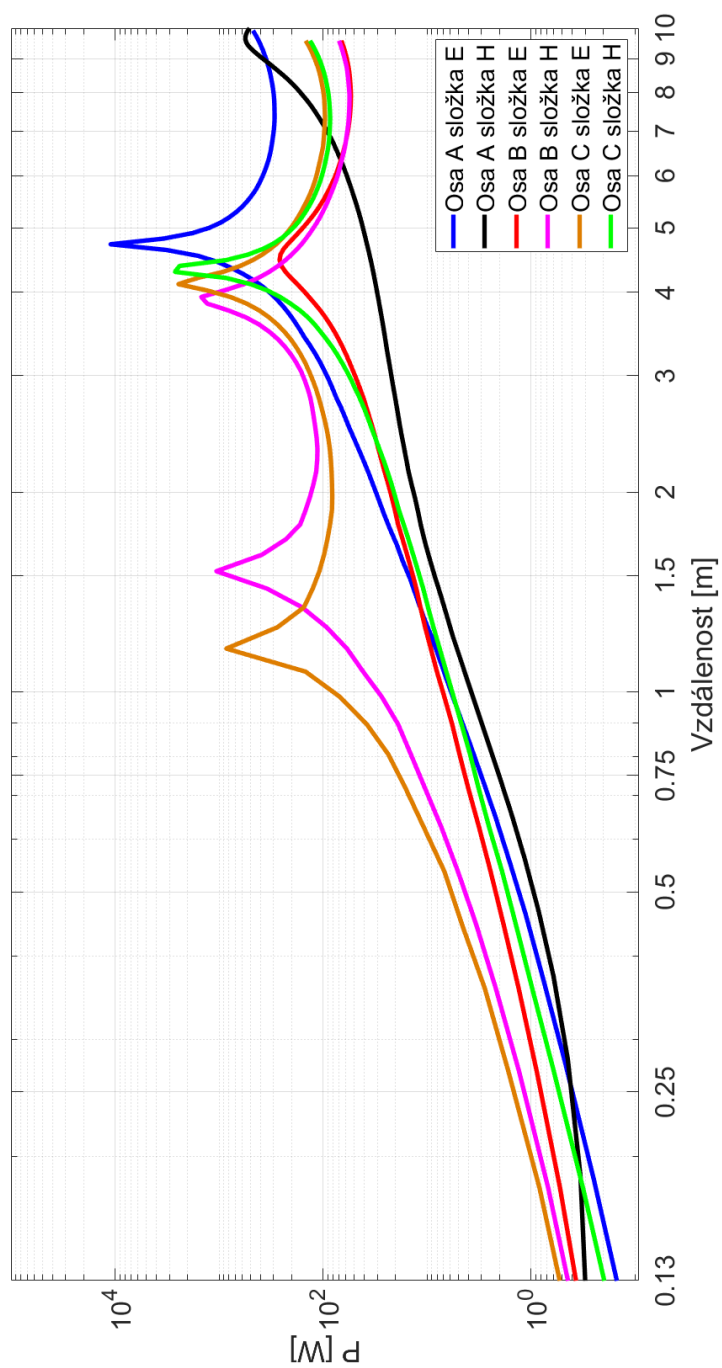
Obrázek E.8: Složka  $H$  0,5 m anténou změřeno



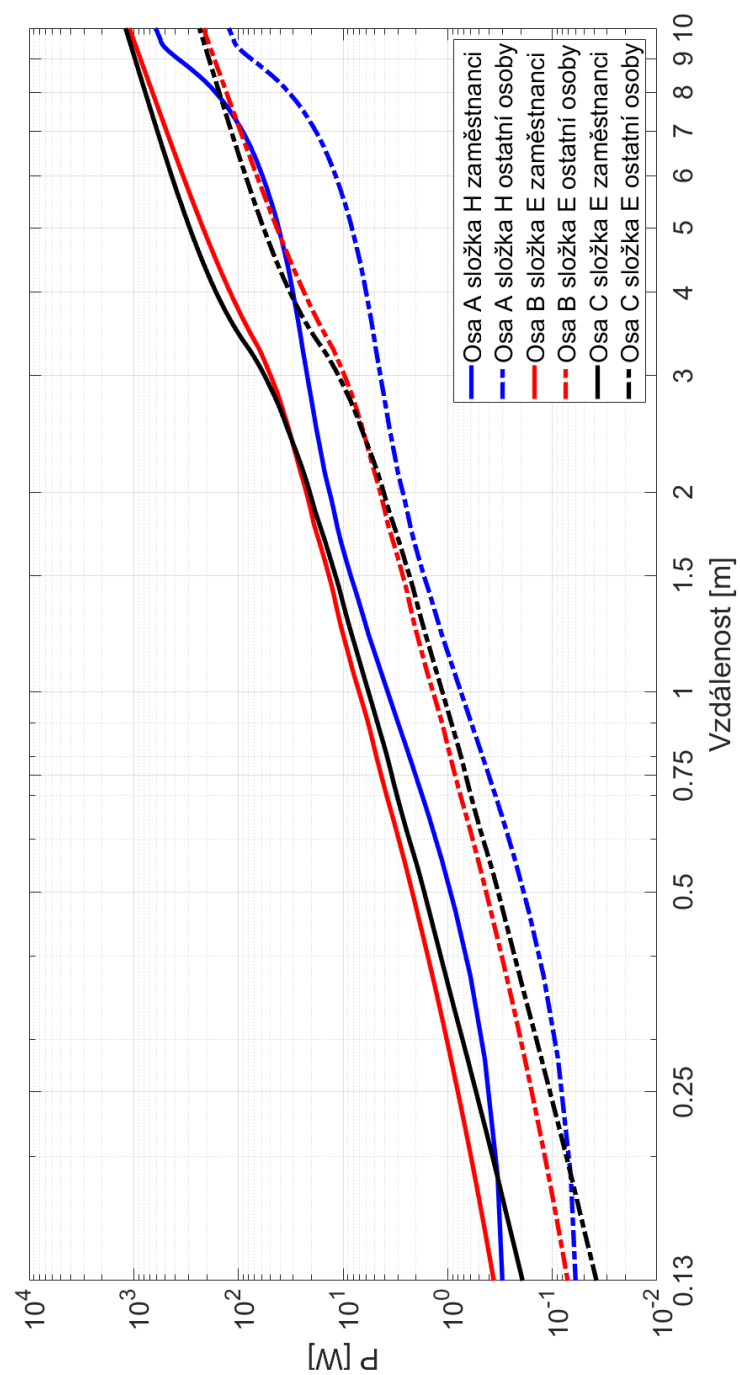
Obrázek E.9: Závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti složka E



Obrázek E.10: Závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti složka H



Obrázek E.11: Závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti



Obrázek E.12: Aproximovaná závislost výkonu na bezpečné vzdálenosti

## F Tabulky bezpečných vzdáleností

Tabulka F.1: Referenční hodnoty bezpečné vzdálenosti od antény pro jednotlivé výkony

Výkon [W]	Osa A [m] Zaměstanci/ostatní	Osa B [m] Zaměstanci/ostatní	Osa C [m] Zaměstanci/ostatní
1	0,518/1,148	0,295/0,831	0,365/0,939
5	1,149/3,382	0,821/2,141	0,931/2,213
10	1,641/5,552	1,222/3,035	1,362/2,904
15	2,148/6,581	1,581/3,467	1,696/3,258
20	2,751/7,153	1,859/3,789	1,958/3,485
25	3,381/7,556	2,121/4,087	2,182/3,702
30	3,988/7,852	2,359/4,364	2,369/3,915
35	4,499/8,058	2,571/4,624	2,529/4,122
40	4,919/8,254	2,743/4,869	2,672/4,325
45	5,264/8,415	2,892/5,102	2,788/4,525
50	5,555/8,537	3,016/5,325	2,885/4,718
55	5,814/8,645	3,128/5,536	2,978/4,911
60	6,04/8,743	3,231/5,741	3,058/5,097
65	6,241/8,832	3,318/5,935	3,129/5,281
70	6,42/8,911	3,392/6,124	3,188/5,461
75	6,579/8,986	3,451/6,305	3,245/5,635
80	6,725/9,059	3,515/6,482	3,298/5,811
85	6,855/9,131	3,581/6,653	3,331/5,981
90	6,971/9,2	3,645/6,817	3,384/6,145
95	7,074/9,271	3,708/6,979	3,428/6,311
100	7,171/9,342	3,769/7,135	3,471/6,471

Tabulka F.2: Bezpečný výkon v závislosti na vzdálenosti od antény

Bezpečná vzdálenost [m]	Osa A [W] Zaměstanci/ostatní	Osa B [W] Zaměstanci/ostatní	Osa C [W] Zaměstanci/ostatní
0,5	1/0,2	3/0,5	2/0,5
1	4/1	7/1,5	6/1,5
1,5	9/2	14/3	12/3
2	14/3	23/5	21/4
2,5	18/4	34/6	34/7
3	22/5	50/10	57/11
3,5	26/6	79/15	104/21
4	31/7	120/24	163/32
4,5	35/8	166/31	226/45
5	42/9	217/43	292/58
5,5	49/10	276/55	362/71
6	60/12	339/67	435/85
6,5	73/15	410/81	513/101
7	92/19	487/96	596/117
7,5	120/25	570/113	683/134
8	165/33	661/130	775/153
8,5	243/49	759/150	872/172
9	381/76	865/171	975/192
9,5	543/109	979/193	1083/213
10	619/124	1100/217	1198/238